UNIVERSITÉ DE STRASBOURG — FACULTÉ DE PHARMACIE

Année 1941-1942 N° 295

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RESPIRATION DANS LES APPAREILS A CIRCUIT FERMÉ

CONDITIONS OPTIMA A RÉALISER

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 1942

A LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE STRASBOURG

pour obtenir le Grade de Docteur de l'Université de Strasbourg

(Mention Pharmacie)

PAR

LAMOTTE Georges

Pharmacien

EXAMINATEURS DE LA THÈSE : MM. C. LAPP, Professeur, *Président.*
Y. VOLMAR, Professeur, *Juge.*
A. GUILLAUME, Professeur, *Juge.*

CLERMONT-FERRAND-PARIS
IMPRIMERIES PAUL VALLIER
—
1942

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG — FACULTÉ DE PHARMACIE

Année 1941-1942 N° 295

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE
DE LA
RESPIRATION DANS LES APPAREILS A CIRCUIT FERMÉ

CONDITIONS OPTIMA A RÉALISER

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 1942

A LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE STRASBOURG

pour obtenir le Grade de Docteur de l'Université de Strasbourg

(Mention Pharmacie)

PAR

LAMOTTE GEORGES

Pharmacien

EXAMINATEURS DE LA THÈSE : MM. C. LAPP, Professeur, *Président.*
Y. VOLMAR, Professeur, *Juge.*
A. GUILLAUME, Professeur, *Juge.*

CLERMONT-FERRAND-PARIS
IMPRIMERIES PAUL VALLIER

1942

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

FACULTÉ DE PHARMACIE

ADMINISTRATION

MM. A. SARTORY, *Doyen*, C. ✻, I. ✿, C. ❁
VOLMAR, *Assesseur*, ✻, I. ✿
MARANDON, *Secrétaire*, ✻, ⚜, , ✿

DOYEN HONORAIRE

M. JADIN, O. ✻, I. ✿, ❁

PROFESSEURS

MM. A. SARTORY, C. ✻, I. ✿, C. ❁	Bactériologie.
LAVIALLE, ✻, I. ✿, ❁	Botanique.
VOLMAR, ✻, I. ✿	Chimie organique.
GUILLAUME, O. ✻, ⚜, I. ✿, ❁	Pharmacie galénique.
LAPP, I. ✿	Chimie analytique.
CORDIER, ✿	Pharmacie chimique.
R. SARTORY, ✿, ❁	Matière médicale.

MAITRE DE CONFÉRENCE

M. DUQUENOIS	Toxicologie.

PROFESSEUR HONORAIRE

M. JADIN, O. ✻, I. ✿, ❁

COURS COMPLÉMENTAIRE

MM. A. SARTORY	Hygiène.
LAVIALLE	Hydrologie.
VOLMAR	Chimie minérale.
GUILLAUME	Zoologie.
LAPP	Physique.
PRÉLOT	Législation et Déontologie.
CORDIER	Chimie biologique.
R. SARTORY	Cryptogamie.
Mme LALLEMAND	Pharmacodynamie.

CHEFS DE TRAVAUX PRATIQUES

M. COLLARD, ⚜, I. ✿	Chimie pharmaceutique.
Mme LALLEMAND, ✿	Chimie et Physique.
MM. JÆGER	Histoire naturelle.
LEDOUX	Bactériologie et Parasitologie.

A MONSIEUR LE COLONEL Paul BRUÈRE

DOCTEUR ÈS SCIENCES ET EN PHARMACIE DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS
LAURÉAT DE L'INSTITUT ET DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Hommage de profonde reconnaissance
et de sincère attachement.

Au Président du Jury de notre Thèse :

MONSIEUR LE PROFESSEUR Charles LAPP

PROFESSEUR DE PHYSIQUE, CHIMIE ANALYTIQUE ET TOXICOLOGIE

En témoignage de profonde gratitude.

AVANT-PROPOS

Les recherches expérimentales, et le présent travail, qui en est la conclusion, ont pu être menés à bien grâce à l'aide de nos Maîtres, que nous prions de trouver ici nos vifs remerciements.

Nous exprimons notre particulière gratitude à M. le Professeur LAPP, qui a bien voulu accepter la présidence de notre Jury de Thèse, et dont les précieux conseils nous ont conduit à dégager de notre travail des conclusions dont l'application sera sans doute utile.

Nous prions MM. les Professeurs VOLMAR et GUILLAUME, Membres du Jury, d'agréer l'assurance de notre reconnaissance, et de nos respectueux sentiments.

Que M. le Pharmacien Colonel BRUÈRE, qui nous a soutenu et guidé pendant quatre années, grâce à sa haute compétence en matière de défense passive, veuille bien trouver ici l'assurance de notre gratitude et de notre profond et respectueux attachement.

Nous exprimons enfin nos remerciements à M. DUVERGER, Ingénieur des Travaux Publics, qui a su réaliser dans le domaine pratique, des dispositifs capables de satisfaire les exigences découlant des théories et de l'expérimentation. Nous l'assurons de notre affectueux respect.

INTRODUCTION

Des études pratiques, du domaine expérimental, pour la réalisation d'un appareil portatif répondant aux conditions optima de la respiration en milieu clos, nous ont conduit à réunir dans un travail d'ensemble la documentation et les résultats obtenus.

Après avoir rappelé, dans un premier chapitre, les données essentielles concernant la respiration, nous verrons dans un second chapitre en quoi consiste un appareil à circuit fermé portatif, puis nous étudierons chacun des facteurs qui sont susceptibles de modifier la respiration :

a) Les variations du taux d'oxygène de l'air ;
b) Les effets du gaz carbonique dans l'air inhalé ;
c) La vapeur d'eau à diverses températures ;
d) La diminution du volant d'azote ;
e) Les poisons respiratoires ;
f) L'intensité du travail ;
g) Enfin, les inconvénients propres aux appareils de protection ;
h) La dépression ou la résistance.

A titre d'exemple, nous donnerons la description et les caractéristiques de fonctionnement d'un appareil respiratoire, en cycle fermé, avec régénération de l'air expiré par un peroxyde, dans lequel nous nous sommes efforcés de réduire au minimum et parfois même de supprimer la plupart des inconvénients des appareils isolants.

Nous indiquerons une méthode que nous proposons, pour la détermination du volume physiologique de l'espace nuisible.

En conclusion, nous donnerons les résultats pratiques de ce travail.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE I

Rappel de quelques données essentielles concernant la respiration

La respiration est le processus physico-chimique par lequel les tissus de l'organisme reçoivent l'oxygène nécessaire à leurs combustions cellulaires et éliminent le produit de ces oxydations : le gaz carbonique accompagné de vapeur d'eau.

Le véhicule de ces gaz est le sang. Il fixe au passage dans les capillaires pulmonaires l'oxygène, sous forme de combinaison instable sur son hémoglobine. L'oxyhémoglobine ainsi formée est réduite au niveau des tissus d'après la réaction réversible $Hb + O^2 \rightleftharpoons HbO^2$.

Ces deux réactions sont commandées par les variations de la pression relative de l'oxygène, pression qui est maxima dans le poumon et minima dans les tissus. L'oxyhémoglobine cède donc son oxygène au plasma qui, à son tour, le transmet aux cellules.

L'anhydre carbonique, résultant de l'oxydation des glucides se retrouve dans le sang sous quatre formes différentes :

La plus importante partie de CO^2 forme de l'acide carbonique avec l'eau du sang, et dans la proportion des 19/20e, se combine aux bases en les déplaçant de leurs combinaisons protéiniques, suivant les équations schématiques :

$$H^2CO^3 + B\ Ps = B.HCO^3 + H\ Ps$$
$$H^2CO^3 + B\ Pc = B.HCO^3 + H\ Pc$$

dans lesquelles :

B Ps désigne les bases combinées aux protéines du sérum,
B Pc les bases combinées aux protéines des globules.

Le vingtième restant se dissout simplement dans le plasma, et s'ionise en partie sous la forme CO^3H'.

La seconde partie, la moins importante, se fixe sur l'hémoglobine réduite, en formant une carbohémoglobine qui sera décomposée dans le poumon lors de l'oxygénation du sang.

On trouve donc en définitive :

1° Du bicarbonate de Sodium ;

2° Du gaz carbonique dissous ;

3° De l'acide carbonique ionisé ;

4° De la carbohémoglobine.

Le rapport entre les différents états du gaz carbonique est donné dans le tableau ci-dessous :

pour 100 cc de sang :		artériel	veineux
Oxygène		20 cc	12 cc
Gaz carbonique	en dissolution	2 cc	2 cc 5
	en bicarbonates	25 cc	30 cc
	en combin. protéïques	13 cc	17 cc 5

L'action des ions CO^3H' est importante ; c'est par leur quantité relative dans le sang que le centre nerveux respiratoire, qui se trouve dans le bulbe rachidien, est excité.

Lorsque l'alcalinité sanguine tend à diminuer à la suite d'un travail fourni ou d'une inhalation de gaz carbonique, l'excitation du centre respiratoire met en action les mécanismes compensateurs. En particulier, les mouvements du poumon s'amplifient et les contractions cardiaques s'accélèrent.

En outre de ce processus physiologique qui lutte directement par une ventilation pulmonaire plus intense, et une circulation du sang plus rapide, il existe dans le sang une réserve alcaline constituée par des bases en combinaison protéinique, susceptibles de saturer l'acide carbonique qui les déplace de leurs combinaisons.

L'ensemble de ces mécanismes maintient constant l'équilibre acido-basique $\frac{CO^3\,H^2}{CO^3\,M^2}$ pour un pH sanguin normal oscillant de 7,35 à 7,45.

Ces échanges gazeux sont conditionnés, de l'extérieur, par la richesse de l'air inspiré en oxygène, en gaz carbonique et par la pression de ces gaz. Il faut, en outre, que l'atmosphère ne contienne pas de produits ayant pour l'hémoglobine plus d'affinité que l'oxygène, comme par exemple l'oxyde de carbone, qui la fixe sous une forme irréversible : la carboxyhémoglobine. D'autres toxiques laquent le sang, comme l'acide cyanhydrique, ou enfin lèsent les cellules pulmonaires.

Le passage de l'atmosphère au contact des capillaires du poumon répartis dans les acini pulmonaires, est obtenu par un effet de vide, résultant de l'élargissement de la cage thoracique. Celle-ci est relevée par la contraction des muscles scalènes, insérés sur les côtes. Dans le même temps, le diaphragme, en s'abaissant, la dilate vers le bas. L'expiration est le résultat du relâchement des scalènes, et du diaphragme et, si l'on désire lui donner de la force, la contraction des muscles abdominaux intervient.

Ces contractions musculaires sont à la fois involontaires et volontaires. Si le réflexe est placé sous le contrôle du centre respiratoire, la volonté peut modifier le rythme de la contraction, son amplitude et sa durée. La limite est toutefois atteinte assez vite (sauf une longue accoutumance du centre respiratoire), dès que l'acidose apparaît.

La ventilation pulmonaire est loin d'intéresser tout le volume du poumon. Le tableau suivant, qui correspond à une moyenne, permet d'en analyser les modalités.

Capacité totale moyenne du poumon	Capacité totale de Hutchison	Air complémentaire	1 litre 50
		Air courant	0 — 50
		Air de réserve	1 — 50
4 litres 50	3 litres 50	Air résiduel	1 —

On voit que, étant au repos, la respiration n'intéresse que 0 l. 50 d'air. Ce volume passe à deux litres au moment d'un travail notable, et peut monter à 3 l. 50 dans le cas limite où le sujet remplit au maximum son poumon, et expire le plus complètement possible.

Les bronches gardant un calibre fixe et les lobules pulmonaires n'étant pas comprimables intégralement, un volume résiduel de 1 litre reste constamment dans le poumon.

Cet air résiduel garde une teneur remarquablement constante en gaz carbonique de 5,6 % (constante de Gréhant).

Ce que nous avons vu de l'excitation du centre respiratoire, par le gaz carbonique, nécessite absolument que cette teneur soit constante ; elle participe à l'équilibre de l'ensemble.

Ces notions, que nous venons de rappeler brièvement, nous ont paru suffisantes pour l'étude particulière que nous voulons faire. Nous entrerons toutefois dans certains détails lorsque cela sera nécessaire pour élucider quelque point particulier.

CHAPITRE II

Appareils respiratoire à circuit fermé

Dans les cas où l'atmosphère devient irrespirable, soit qu'elle ne contienne plus la quantité d'oxygène indispensable, soit qu'elle présente un excès de gaz carbonique, soit enfin qu'elle contienne un toxique non condensable sur le charbon actif d'une cartouche filtrante, force est de recourir à un dispositif hermétique qui isole les voies respiratoires de l'atmosphère extérieure et qui fournit à la pression normale un mélange aussi semblable que possible à l'air atmosphérique.

Ces appareils sont dits « à circuit fermé » ou encore « isolants » parce que les gaz y accomplissent un trajet que l'on peut schématiser ainsi :

Poumon ⟶ Générateur ⟶ Epurateur ⟶ Sac respiratoire ⟶ Poumon ⟶ etc...

Ils sont constitués par les éléments suivants : un *masque* s'adaptant hermétiquement à la figure, réuni par un *tuyau* muni d'une *soupape* s'ouvrant à l'expiration, avec un dispositif *générateur* d'oxygène.

L'air se rend ensuite dans un *épurateur,* chargé de fixer le gaz carbonique et la vapeur d'eau, puis dans un *sac souple* qui se gonfle lors de l'expiration et se vide lors de l'inspiration.

Ce sac communique avec le masque par un tuyau qui comporte à son entrée une *soupape* s'ouvrant à l'inspiration.

C'est seulement par le sac respiratoire que l'appareil dépend de l'atmosphère environnante, sous le rapport de la pression, qui est à cet endroit du dispositif, égale à la pression extérieure.

Les appareils isolants se classent en cinq catégories, suivant la source employée pour produire l'oxygène.

1° Un réservoir d'air comprimé fournit l'atmosphère respirable, les gaz expirés sont intégralement rejetés au dehors.

2° L'oxygène est produit par la combustion d'une chandelle composée de Chlorate de Potasse, Fer porphyrisé et amiante. Le débit d'oxygène est constant. Les gaz expirés sont purifiés sur un alcali.

3° L'oxygène est fourni par un réservoir sous pression, et les gaz expirés sont purifiés sur de la chaux sodée ou de la Soude.

4° L'oxygène vient d'un réservoir sous pression, et les résidus de la respiration sont fixés sur un peroxyde alcalin.

Cette réaction dégage une certaine quantité d'oxygène, ce qui prolonge la durée de protection.

5° Un générateur contenant un peroxyde alcalin suffit à la régénération de l'air. Les quantités de gaz carbonique et de vapeur d'eau qui réagissent sur des peroxydes, dégagent une quantité exactement proportionnelle d'oxygène.

On voit dans cette classification que le premier système est isolant, mais non à circuit fermé.

L'étude des conditions de la respiration que nous allons exposer s'applique surtout au cinquième type, ou aucune source de pression ne vient en aide au travail respiratoire, et où l'utilisation intégrale du gaz carbonique et de la vapeur d'eau est indispensable.

———

CHAPITRE III

Métabolisme de l'oxygène

On éprouve quelque surprise, en étudiant la respiration, de voir que l'oxygénation qui semble être l'objet principal de l'ensemble physico-chimique de ce phénomène, n'a presqu'aucune action dans le système régulateur de son métabolisme. Bien plus, dans un espace clos, le gaz carbonique joue un rôle beaucoup plus important que celui de l'oxygène.

Deux cas peuvent se présenter que nous verrons successivement : l'augmentation du volume relatif de l'oxygène dans l'air, et sa diminution.

Nous verrons plus loin les effets des changements de pression.

La résultante des oxydations organiques est exprimée dans le tableau suivant, qui compare, en volumes, la composition de l'air inspiré, à celle de l'air expiré.

	Atmosphère	Air expiré
Oxygène	210 litres	170 litres
Azote	790 —	790 —
Gaz carbonique	3 —	40 —

Aucun des trois composants de l'air ne peut varier en rapport de volume, sans qu'il y ait un ralentissement sur l'hématose et sur l'élimination de CO^2.

Sous oxygénation.

Si, toutes choses égales par ailleurs, on diminue la richesse de l'air en oxygène, on constate successivement amplification de la respiration, qui devient haletante ; puis dans une deuxième phase, accélération, inspirations brèves, entrecoupées de profondes inspirations. Ce rythme particulier est appelé rythme de Cheyne-Stokes, du nom de ceux qui l'ont décrit les premiers.

Plus tard, la respiration est arythmique, superficielle, enfin la mort survient.

Chacune de ces phases correspond à un stade physico-chimique particulier.

1° Phase d'amplification. — Elle correspond à un début d'anoxémie.

Il existe, entre le besoin d'oxygène et le centre respiratoire, un intermédiaire qui est l'acide carbonique. La diminution du taux d'oxygène du sang abaisse le seuil d'excitation du centre respiratoire par l'acide carbonique (Prof. DAUTREBANDE). Comme à ce moment, il existe une grande quantité de gaz carbonique dans l'organisme, les mouvements respiratoires sont amplifiés.

Si la diminution du taux d'oxygène est très lente, de façon à rester continuellement au voisinage du seuil d'excitation, qui s'abaisse en même temps, l'asphyxie se produit sans réaction d'hyperpnée.

2° Phase de respiration irrégulière. — La chute plus rapide du taux d'oxygène, produit, grâce au même phénomène, l'excitation du centre respiratoire qui, plus brutale, se traduit par le rythme de Cheyne-Stokes. Ce rythme trahit le début de la fatigue du centre nerveux.

3° En parvenant à 10 % d'oxygène, la phase de respiration superficielle survient. L'excitation du centre respiratoire est telle, que les mouvements du poumon sont précipités, de telle sorte que celui-ci n'a plus le temps de se développer. Le volume d'air inspiré est de plus en plus faible, l'anoxémie augmente de plus en plus, et amène paralysie et perte de conscience.

On obtiendrait exactement les mêmes phénomènes si, au lieu de donner un volume respirable normal, à taux d'oxygène décroissant, on diminuait le volume d'air offert à l'inspiration. L'analyse de l'air expiré, montre alors qu'il y reste une plus grande proportion d'oxygène que normalement. Ceci est dû au fait que l'air n'atteint qu'une faible partie du poumon, et si le sang s'y oxygène normalement, il n'en est pas de même dans les alvéoles qui conservent un *air résiduel*. La moyenne obtenue est insuffisante pour une hématose normale.

Seuil de fixation de l'oxygène, en fonction de la teneur de l'air.

Le Colonel BRUÈRE a été amené, dans l'étude des abris, à déterminer le seuil de fixation de l'oxygène, qui est en même temps le taux le plus économique auquel il convient de maintenir l'oxygène lorsqu'on doit le débiter dans un lieu clos.

Toutes choses étant égales par ailleurs, l'hématose se poursuit normalement pour une teneur qui reste tolérable à 17,5 % et qui à 14 % ne doit présenter qu'un caractère momentané. L'organisme supplée à l'appauvrissement de l'air par une ventilation plus importante.

Nous verrons au Chapitre IX que la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine est liée à la pression plutôt qu'au rapport de l'oxygène aux autres composants de l'air.

Seuil d'intolérance pour l'oxygène.

L'hémoglobine n'est pas capable de fixer beaucoup plus d'oxygène que ne le comporte la réaction de formation de l'oxyhémoglobine. Tout au plus peut-on augmenter dans de faibles proportions la quantité d'oxygène dissoute dans la plasma.

Il n'y a donc pas intérêt à élever sensiblement la teneur d'oxygène dans un appareil à cycle fermé.

Mais y a-t-il un inconvénient à le faire, et à partir de quel pourcentage en oxygène y a-t-il intolérance ?

D'après les auteurs qui ont fait des expériences, et à la suite de nos propres essais, une teneur portée à 30 % peut être supportée pendant une demi-heure, sans le moindre inconvénient ultérieur.

Si on monte à 50 % et au-dessus, d'après Lorain-Smith (1898), des lésions du tissu pulmonaire se produisent. Le facteur « temps » présente dans ce cas la plus grande importance : il est plus dangereux de subir les effets d'une atmosphère contenant 50 % d'oxygène pendant une heure, que 60 % pendant quelques minutes.

Le Professeur Dautrebande a montré qu'il se produit de la congestion pulmonaire ou de l'œdème, lorsqu'on soumet le poumon au contact d'une atmosphère composée pour moitié d'oxygène. Soit que le tissu vasculaire sanguin, ou le tissu lymphoïde subisse le premier les effets irritants de l'oxygène, on obtient la prédominance de l'un ou l'autre des désordres que nous venons de voir. L'œdème pulmonaire, « noyade interne », une fois amorcé, se continue même si on soustrait le sujet à l'action de l'atmosphère suroxygénée.

Dans un appareil bien conçu, ce danger doit être absolument écarté, du fait d'un débit d'oxygène automatiquement réglé et correspondant exactement à la consommation.

Pour compenser la faible dépression qui, nous le verrons plus loin, est impossible à éviter complètement, nous pensons qu'une légère élévation du taux d'oxygène est à conseiller. Nous avons constaté qu'un pourcentage de 22 à 25 % donnait au sujet en expérience une certaine euphorie. D'autre part, tenant compte du fait qu'un effort brusque amène une consommation instantanée importante d'oxygène, il est intéressant d'avoir dans l'atmosphère intérieure une certaine marge, surtout si le générateur est à réaction chimique.

Signalons ici un phénomène subjectif que nous avons souvent constaté sur nous-mêmes au cours de nos essais, qui présente de l'intérêt pour les expérimentateurs et pour les porteurs d'appareils dans lesquels le débit d'oxygène est réglable à volonté par le sujet.

On sait que si la proportion d'oxygène tend vers 16 %, le patient commence à subir les effets de l'asphyxie tissulaire. Sa respiration devient plus profonde ; on constate vers la fin de l'inspiration, un effort pour augmenter le volume d'air inspiré. C'est seulement plus tard qu'apparaîtra la respiration asphyxique caractérisée par le rythme de Cheyne-Stokes.

Or dons le cas contraire d'une suroxygénation de quelque durée, si par exemple le pourcentage d'oxygène monte à 30 % pendant une dizaine de minutes, les mouvements respiratoires deviennent plus lents. Ceci peut s'expliquer par le fait que les besoins en oxygène sont plus que satisfaits, et par l'élévation du seuil d'excitation par CO^2.

Donc au début, dans les deux cas de suroxygénation et de sous-oxygénation, le patient sent sa respiration se ralentir. Il lui est impossible de déterminer avec certitude ce qui se passe dans son appareil. Et comme il a toujours la crainte de manquer d'oxygène, il n'hésite pas à augmenter le débit de sa source. Le résultat, outre la diminution du temps de protection de l'appareil, est le risque d'œdème pulmonaire.

Il est par conséquent enssentiel que le débit d'oxygène ne puisse en aucun cas dépasser notablement les besoins respiratoires, faute d'un procédé permettant à tout moment de connaître la composition de l'atmosphère intérieure.

CHAPITRE IV

Effets produits par les variations du taux du gaz carbonique dans l'air

Il faut se placer à deux points de vue pour étudier les effets du gaz carbonique sur la respiration :

1° Au point de vue physiologique, les teneurs de l'air en CO^2 interviennent pour modifier, d'une part les mouvements respiratoires, et d'autre part l'hématose elle-même ;

2° Au point de vue pathologique, le gaz carbonique se comporte comme un toxique, non négligeable si sa teneur est assez importante dans l'atmosphère.

1° Role physiologique du gaz carbonique.

Nous avons vu plus haut que les mouvements respiratoires sont commandés par un processus chimiquement nerveux-musculaire.

En milieu normal, les taux d'acide carbonique dans l'air résiduel et dans le sang sont constants. Si ce taux a tendance à s'élever, soit par production plus intense à la suite d'un travail, soit par une diminution de l'élimination, soit enfin par une élévation du pourcentage de CO^2 dans l'air inspiré, le centre respiratoire réagira par excitation des muscles moteurs du poumon et du cœur.

Une hausse de 0,20 % dans la teneur de l'air résiduel double la ventilation pulmonaire. Réciproquement, une baisse de 0,20 % provoque l'apnée. Si, par respiration forcée, on abaisse le taux de gaz carbonique de l'air résiduel, il peut y avoir mort en apnée.

Ce mécanisme, d'action quasi instantanée, ramène très vite le sang à son état normal. Mais si on laisse subsister pendant quelques temps le taux anormal de CO^2 dans l'air, par exemple à 3 %, on verra diminuer le phénomène de réaction. Ceci confirme la loi qui dit que la sensation est différentielle.

Quel va être sur le sang l'effet de l'enrichissement en CO^2 ? Nous avons vu qu'une petite partie de ce gaz se fixe sur l'hémoglobine. Celle-ci, par l'obstacle opposé à l'élimination de CO^2 en conservera

une quantité anormale. Or, si l'hémoglobine, oxygénée ou non, a une même affinité pour CO^2, il n'en est pas de même réciproquement. La carbohémoglobine n'est pas capable de fixer autant d'oxygène que l'hémoglobine.

Un phénomène opposé vient dans une certaine mesure compenser cet inconvénient : la tendance vers l'acidose du sang accélère la vitesse de réduction de l'oxyhémoglobine. Si donc, il y a moins d'oxygène fixé au niveau du poumon, en compensation relative, il y a plus d'oxygène cédé aux tissus.

Nous conclurons de ces faits qu'une faible teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère artificielle n'a pas de conséquences graves.

2° Influence de la durée de séjour dans une atmosphère contenant du gaz carbonique.

Si une atmosphère contenant 5 % de gaz carbonique est respirée pendant assez longtemps, il se produit une fatigue du centre respiratoire.

Nous empruntons au Docteur Funck-Hellet, qui a bien voulu se prêter à des expériences de contrôle de notre appareil, les lignes suivantes : « Pendant une demi-heure, la respiration fut bonne, régu-« lière et lente. Puis progressivement, il y eut gêne respiratoire, désir « de trouver de l'air frais, maux de tête, sensation de défaillance, trou-« bles oculaires sous forme de scintillement à chaque battement de « paupière. En persistant avec effort, il y eut rythme de Cheyne-« Stokes ».

Un prélèvement d'air fait à ce moment a montré un pourcentage d'oxygène de 21 % et un pourcentage de gaz carbonique de 4 %. Le Docteur Funck-Hellet ajoute (ce qui montre bien que le centre respiratoire est éducable) : « A noter qu'au même moment un jeune « homme déjà entraîné a pu conserver son masque une heure et quart ».

Toxicité du gaz carbonique.

Bien que le gaz carbonique soit considéré habituellement comme non toxique, l'inhalation de grandes quantités de ce gaz peut avoir des conséquences mortelles, justement par le jeu même des mécanismes compensateurs.

En soumettant un sujet à une atmosphère contenant 20% de CO^2 on constate les réactions suivantes : d'abord une phase d'excitation, que nous avons déjà décrite. A cette phase de défense qui se carac-

térise par l'ivresse carbonique, succède une phase de dépression, où apparaissent successivement : anesthésie du centre respiratoire, affaiblissement des mouvements du poumon et du cœur, enfin perte de connaissance. Si l'administration de CO^2 continue, la mort survient par arrêt du cœur et du poumon.

Si on soustrait à temps le sujet à l'atmosphère toxique, l'acidose asphyxique, qui avait provoqué une importante et précoce mobilisation de radicaux basiques des tissus vers le sang, cesse brusquement. Mais peu de temps après survient une crise brutale de convulsions qui se termine par la mort en tétanie.

On voit par là que c'est la variation brusque de l'équilibre acide-base qui entraîne les phénomènes mortels.

Il conviendra donc de ne supprimer que progressivement un excès de gaz carbonique qui se serait produit accidentellement dans un appareil à circuit fermé.

Le tableau ci-dessous, que nous empruntons à MM. Hederer et Istin, résume les effets obtenus par des taux croissants de CO^2.

Pourcentage de CO^2 dans l'air inspiré	Concentration en mill. par litre	Effets produits
4 à 5 centièmes	72 milligrammes	Augmentation de la ventilation pulmonaire excitation du centre respiratoire.
8 à 10 centièmes	114 à 180 milligr.	Picotements du nez et de la gorge, céph vertiges, nausées. Palpitations. Tendance sommeil. Polypnée, élévation de la tens Ralentissement du pouls. Parfois vomi ments. Ivresse.
10 à 20 centièmes	180 à 360 milligr.	Persistance des symptômes précédents, pert connaissance, avec narcose, cyanose.
20 % et plus	360 milligrammes	Arrêt progressif de la respiration. Arrêt cœur.

Il nous a été donné d'assister en 1932 à une réunion de techniciens, sous la présidence de M. le Professeur Tanon, qui avait pour objectif de déterminer la teneur en CO^2 qui pouvait être considérée comme le seuil de l'intolérance, ou encore comme la limite de l'euphorie respiratoire.

Dans les sous-marins, au delà de 1,50 %, le personnel éprouve une certaine peine à accomplir sa tâche (Commandant Clatin).

Le Colonel Bruère a montré que, dans les abris, et au repos, l'organisme supporte très aisément une teneur de 3 % en CO^2 pendant

quelques heures (1). Il nous est souvent arrivé, au cours de nos expériences, de respirer un air artificiel chargé de 3 % de CO^2, sans en éprouver de gêne.

Le cahier des charges pour la réception des appareils respiratoires en circuit fermé admet une teneur en CO^2 de 0,02 en cours de fonctionnement.

En conclusion pratique, et considérant l'importance primordiale du taux de gaz carbonique respiré, nous dirons, en accord avec les spécialistes cités plus haut, qu'il est prudent de mettre tout en œuvre pour réduire le pourcentage de CO^2 dans l'air artificiel. On fera le possible pour ne pas dépasser 1,50 % dans les conditions normales.

---

(1) Pratiquement, la notice sur l'organisation des services sanitaires de la défense passive (édit. 1939) a adopté la règle dite « des trois un ». Un mètre cube d'air par personne et par heure, dans un abri où l'atmosphère n'est pas régénérée.

CHAPITRE V

Le degré hygrométrique, en fonction de la température

Le degré hygrométrique est le rapport entre la vapeur d'eau contenue dans un air donné, en pourcentage, et la quantité qu'il contiendrait s'il était saturé, à la même température.

On sait qu'il est aussi pénible de respirer un air trop humide qu'un air trop sec.

Si l'air est trop sec, le desséchement des muqueuses, joint à une plus grande élimination d'eau par le poumon et le corps, est rapidement insupportable.

Mais d'autre part, on dit que la respiration est presque impossible dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau. Il s'agit là naturellement d'un phénomène secondaire dû au ralentissement de l'élimination de la sueur, et de l'eau provenant des réactions tissulaires.

Le déconfort s'augmente, pour le porteur d'un masque, du fait du ruissellement de l'eau condensée le long du protège-figure.

A ce sujet, il ne nous paraît pas sans intérêt de rappeler ici les travaux de MM. Lefèvre et August, qui ont signalé que toutes les fois qu'il y avait simultanément élévation du degré hygrométrique et de la température, l'organisme avait tendance à réduire automatiquement ses combustions internes, ce qui produit une sensation de malaise susceptible d'être ressentie sous le masque, en dehors de toute influence de l'espace nuisible.

D'après les auteurs américains, spécialistes du conditionnement de l'air, l'atmosphère la plus agréable a un degré hygrométrique compris entre 35 et 65 %.

Quelles sont les sources de vapeur d'eau dans un appareil clos ?

1° *La transpiration.* La compression de la face, l'effet du protège-figure qui supprime le refroidissement normal de la peau, font que la transpiration apporte une quantité d'eau notable. Toutefois, elle n'est considérable que dans le cas où l'appareil comporte un blouson imperméable ou un vêtement complet étanche.

2° *La vapeur d'eau émise par la respiration.* L'air sort des poumons à 37° et saturé de vapeur d'eau à cette température.

Il se refroidit aussitôt au contact des parois froides, et il en résulte une condensation dans les tuyaux et dans les points bas du dispositif.

Refroidi à environ 25°, l'air reste saturé de vapeur d'eau à cette température. Il convient donc de le déshydrater.

Les alcalis, utilisés pour fixer le gaz carbonique, jouissent aussi de la propriété de s'hydrater avec l'eau. La chaux sodée, généralement employée, déshydrate un air saturé à 37° dans la proportion de 75 %. La température est un facteur essentiel, et on veille à ce qu'elle n'approche pas 200° dans le bloc purificateur, au point de réaction. A cette température, la déshydratation de la soude contrebalancerait la fixation d'eau.

S'agissant d'air expiré, contenant 4 % de gaz carbonique, la carbonatation de l'hydroxyde de sodium donne naissance à un carbonate efflorescent et anhydre. A ce moment, se dégage toute la vapeur d'eau qui s'était fixée précédemment.

Voici donc une troisième source de vapeur d'eau, qui peut prendre la plus grande importance à un moment donné.

La quantité de chaux sodée prévue devra donc être suffisante pour que la vapeur d'eau déplacée par le gaz carbonique trouve dans une nouvelle couche de chaux sodée la possibilité de se fixer définitivement.

Le refroidissement du dispositif devra être suffisant pour que la température de l'ensemble n'arrive en aucun cas à 200°.

Lorsque la chaux sodée est doublée d'un peroxyde en vue de la régénération de l'air, la déshydratation est meilleure. Dans tous les cas, il sera possible, en disposant convenablement les absorbants, d'arriver à une moyenne, pour laquelle le degré hygrométrique, un peu faible au début, un peu élevé à la fin, restera dans des limites acceptables.

CHAPITRE VI

Le volant d'Azote

L'Azote n'entre pour ainsi dire pas en ligne de compte dans les études sur la respiration, dans les conditions normales. Ce gaz n'entretient pas la respiration : c'est un diluant de l'oxygène.

Néanmoins, comme sa variation se traduit par une variation relative des autres constituants de l'air, cela lui donne autant d'importance qu'à eux, en milieu clos.

Certains appareils, pour éviter une surpression, dans le cas d'un débit trop intense à un moment donné, ou d'un débit constant réglé obligatoirement trop fort ou encore lorsque de l'azote est débité avec l'oxygène, possèdent une soupape s'ouvrant à l'air libre. Malheureusement, cette soupape ne fait pas de discrimination, et laisse s'échapper l'azote en même temps que l'oxygène. On tombe alors dans le cas de la suroxygénation, puisque c'est seulement le rapport des volumes des gaz qui comptent et non pas leur valeur absolue.

On dit que l'azote joue le rôle de volant, puisqu'il accomplit un cycle continuel sans être modifié.

Il est donc clair que ce volant d'azote est aussi précieux que l'oxygène lui même et on doit faire en sorte que les gaz intérieurs ne puissent pas s'échapper.

CHAPITRE VII

Les poisons respiratoires

Les avis restent partagés en ce qui concerne les poisons respiratoires. Depuis que Brown-Sequard et d'Arsonval ont émis l'hypothèse de leur existence, rien n'a pu confirmer ou infirmer cette opinion.

Il est vraisemblable que la voie pulmonaire sert à l'excrétion de déchets autres que le gaz carbonique, à l'égal des autres émonctoires.

Toutefois, nous n'avons jamais pu constater au cours de près de cent expériences, le moindre phénomène d'intoxication, soit que le temps de séjour, qui fut de l'ordre de l'heure, ne soit pas suffisant pour produire une intoxication nette, soit que le peroxyde utilisé pour la régénération ait détruit ces ptomaïnes par oxydation.

Cette destruction ne peut être invoquée dans le cas des appareils à oxygène comprimé ; on est donc en droit de penser que la présence des ptomaïnes pourrait alors amener des accidents. Or il n'en est rien, et là encore aucun élément ne permet de conclure à l'existence et à la nocivité des poisons respiratoires, groupés sous le terme d'anthropotoxines.

CHAPITRE VIII

Variations du débit respiratoire avec le travail

La ventilation pulmonaire varie dans de très larges limites en fonction du travail fourni.

Cette variation répond à une nécessité physiologique correspondant à l'augmentation des combustions tissulaires, qui créent un besoin d'oxygène, et la nécessité d'éliminer le gaz carbonique.

En moyenne, un sujet du poids de 70 kgs utilisera au repos environ 500 litres d'air par heure, en travail moyen 1000 litres, et en travail intensif plus de 2000 litres.

Nous empruntons au travail de MM. Douglas et Henderson, rapporté par M. Jaubert, le tableau suivant qui indique, en fonction du travail fourni, et compte tenu de la pression barométrique, la ventilation pulmonaire, l'utilisation de l'oxygène, la quantité de gaz carbonique produit et les valeurs du quotient respiratoire $\frac{CO^2}{O^2}$.

Travail effectué vitesse de marche sur terrain plat	Inspir. par min.	Pression barom.	Lit. d'air p. min.	Litres CO^2	Consom. O^2 min.	$\frac{CO^2}{O^2}$
2 miles	14.7	751	18.6	0,662	0,780	0,819
3 —	16.2	747	24.8	0,922	1,065	0,866
4 —	18.2	749	37.3	1,398	1,595	0,876
5 —	18.5	754	46.5	1,788	2,005	0,891
6 —	19.5	756	60.9	2,386	2,543	0,938

De l'examen de ce tableau se dégagent les points suivants : lorsque le travail augmente, la ventilation pulmonaire augmente dans une proportion légèrement plus grande.

Il en est de même de l'oxygène fixé et de l'anhydride carbonique dégagé, avec une croissance moins rapide de la valeur de ce dernier.

Le résultat est que le quotient respiratoire tend vers l'unité. Ce fait prend un intérêt certain lorsqu'on utilise le gaz carbonique expiré pour la régénération de l'air, en utilisant sa réaction sur un peroxyde alcalin.

Il convient pour ces raisons de réaliser un dispositif de régénération capable de s'adapter presque instantanément à des allures de marche variant du simple au quintuple.

CHAPITRE IX

Les effets de la dépression dans les appareils clos

Lorsque nous avons étudié les conditions de la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine, nous avons dit que les valeurs du pourcentage de ce gaz ne modifiaient pas sensiblement l'hématose, tant qu'elles ne descendaient pas au-dessous de 17,5 %.

Quelle sera l'influence de la dépression sur l'hématose ?

La pression atmosphérique fait sentir ses effets par l'intermédiaire du sac respiratoire. Nous n'avons à nous préoccuper de ses variations que dans des cas spéciaux, puisque la pression barométrique ne varie sensiblement que par changement d'altitude.

D'après J. S. Haldane, le processus de dissociation de l'oxyhémoglobine d'après la pression à laquelle le sang est soumis, est la suivante : à partir de 107 millimètres de mercure (pression partielle de l'oxygène alvéolaire), 96 % de l'hémoglobine du sang artériel est sous forme d'oxyhémoglobine. Au-dessous de 65 millimètres, la dissociation est très rapide. C'est grâce à ce fait que l'oxygène est fixé, transporté, puis abandonné aux tissus, où la pression relative de l'oxygène est très faible.

Dans des conditions normales, l'incidence de la dépression ne peut donc être très importante.

Par contre, le mal des montagnes et les troubles que ressentent les aviateurs lors d'une ascension rapide, sont le résultat d'une asphyxie partielle. Dans les expéditions stratosphériques, force est d'utiliser des appareils en surpression ou des cabines étanches maintenues à la pression qui règne au niveau du sol.

Dépression venant de l'appareil.

A priori, il ne semble donc pas qu'un appareil comprenant un sac respiratoire souple puisse mettre son porteur en dépression, étant exceptés les cas que nous venons de voir. Mais si l'on mesure les résistances qu'offrent au passage de l'air les tuyaux, les soupapes, et surtout les boîtes contenant sous une forme granulée les matières servant à la régénération de l'air, on comprend pourquoi certains appareils fati-

guent le porteur à l'égal des masques à dispositif filtrant. Ceux-ci offrent une résistance à l'inspiration qui corespond, pour une vitesse moyenne de l'air et un débit de 15 litres-minute, à 10 millimètres d'eau au minimum.

Il est donc recommandable que l'air régénéré vienne directement du sac respiratoire au masque. On groupera les dispositifs chimiques sur le trajet d'expiration qui va du masque vers le sac respiratoire.

Si en effet, l'effort d'expiration à travers une résistance est fatiguant, l'effort d'inspiration est beaucoup plus pénible, pour vaincre la même résistance.

La disposition anatomique des organes moteurs du poumon, muscles scalènes soulevant les côtes, et diaphragme s'abaissant pour dilater l'espace respiratoire vers le bas, a pour effet de faciliter l'expiration, par le poids même de la cage thoracique, et par la réserve de puissance des muscles abdominaux, qui sont capables de fournir des efforts très supérieurs à ceux qui sont demandés pour aider au relèvement du diaphragme.

On sait que les muscles se développent proportionnellement aux efforts qu'ils ont habituellement à fournir. Le travail inspiratoire étant, *grosso modo,* constant, il est évident que si on impose aux muscles scalènes et au diaphragme un effort supplémentaire longtemps poursuivi, le seuil de fatigue sera atteint.

D'autre part, chaque muscle possède, en raison de son rôle et du travail qui lui est habituel, une vitesse optima de contraction. Cette vitesse varie, dans des conditions normales, en raison inverse de la résistance opposée au mouvement. Elle sera la plus économique pour l'organisme, puisque la mieux adaptée, anatomiquement et physiologiquement.

Marey a montré que la résistance appliquée à l'inspiration amplifie le mouvement du poumon. La vitesse de contraction du muscle de son côté diminue, d'où ralentissement de la respiration.

Nous empruntons au Professeur Dautrebande les chiffres suivants, qui ont été établis pour les appareils filtrants, mais qui s'appliquent aux appareils isolants. D'après cet auteur, et nous l'avons maintes fois vérifié nous-mêmes, on constate, lorsqu'on oppose une résistance à l'inspiration de l'ordre de 20 millimètres d'eau, un léger approfondissement de la respiration qui augmente peu à peu, au fur et à mesure qu'on élève la résistance. Vers 50 millimètres apparaît le rythme de Cheyne-Stokes, qui est le signe de la fatigue du centre respiratoire.

Si cette dépression est maintenue quelque temps, et surtout si on l'élève, les phénomènes s'exagèrent, la respiration devient spasmodique, arythmique et superficielle. On dit que le centre respiratoire décompense.

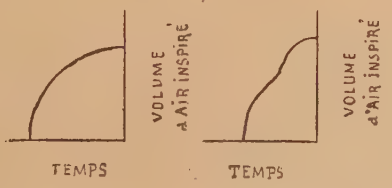
Le Professeur DAUTREBANDE considère ce chiffre de 50 millimètres d'eau comme le seuil de fatigue. Il n'est néanmoins pas indispensable d'arriver à une telle dépression pour obtenir les phénomènes de décompensation ; il suffit que l'expérience soit quelque peu prolongée.

Nous pensons que, dans un appareil à circuit fermé, la dépression mesurée à l'inspiration, ne doit pas dépasser 10 millimètres d'eau pour un débit de 2000 litres-heure.

Influence de la vitesse de l'air.

Ce chiffre peut paraître modeste, car l'expérience montre qu'une semblable dépression est à peine sensible, tout au moins au début. Mais ce n'est pas seulement le débit qu'il faut considérer. Le facteur principal de résistance est la vitesse maxima que les gaz sont susceptibles de prendre à un moment donné.

Ce fait a été mis en lumière par le Professeur DAUTREBANDE qui a étudié les variations de la vitesse de l'air au cours de l'inspiration. Il a montré que chez différents sujets, la courbe d'inspiration varie entre deux types extrêmes, figurés schématiquement sur les graphiques ci-dessous.



On porte en abscisses les temps, et en ordonnées, les volumes d'air qui passent au différents moments de l'inspiration.

Chez certains sujets, l'accroissement de vitesse dans la première moitié de l'inspiration, et le ralentissement dans la deuxième, sont réguliers. Au contraire, chez d'autres, après l'accroissement du début suivi d'un ralentissement, il se produit une brusque et importante accélération qui peut parvenir à un maximum presque deux fois plus élevé que le premier palier constaté.

Si un porteur de masque possède une telle courbe respiratoire, les effets de dépression et de fatigue consécutive seront en rapport direct, non pas avec la moyenne des vitesses, mais avec le maximum constaté.

Pour prendre un exemple concret, un sujet qui respire 2000 litres-heure, s'il présente dans sa courbe respiratoire un maximum d'accélération qui correspond à 3000 litres-heure, éprouvera les effets consécutifs à une résistance en rapport avec le débit de 3000 litres-heure.

On voit par là qu'il importe d'avoir une marge importante de sécurité, faute de quoi il serait nécessaire de connaître la courbe respiratoire de chaque sujet, avant de l'enfermer dans l'appareil.

Elévation de la dépression due à des variations anormales du sujet.

Un effet, d'origine nerveuse, fait varier dans de larges limites la dépression ; nous voulons parler de l'un des facteurs qui font augmenter considérablement la ventilation pulmonaire pendant le travail, la marche, et surtout la course. Dans le réflexe respiratoire il faut distinguer deux éléments : l'un, normal, qui correspond à un besoin d'oxygène accru, l'autre, qui bien que constant, est en quelque sorte anormal, parce qu'inutile.

Ce dernier résulte d'une excitation nerveuse du pneumogastrique, et d'un manquement d'entraînement du centre respiratoire.

Plaçons dans le premier cas l'effet d'une émotion vive, comme la peur, et chez ceux qui portent le masque pour la première fois, un réflexe émotif.

Dans le second cas se trouvent les athlètes au début de leur entraînement. Le principal souci des entraîneurs est de discipliner la respiration de leurs élèves.

Par ces phénomènes nerveux, sans lien avec la régulation normale du rythme respiratoire, on peut admettre que la ventilation dépasse le double de ce qu'elle devrait être au moment considéré. Il en résulte une fatigue anormale qui s'accompagne de dyspnée respiratoire et cardiaque.

On conçoit aisément que si on éprouve alors une résistance à l'inspiration, les conséquences de cet état de choses seront multipliées.

Cet élément psychologique d'angoisse, dès qu'il y a gêne à l'inpiration, est le premier à vaincre lorsqu'on veut habituer quelqu'un au port du masque.

Nous l'avons constaté au cours de la dernière guerre, où nous étions chargé d'un service de défense passive. Il faut un entraînement pour supporter le masque muni d'une cartouche filtrante. Certains sujets nerveux ne peuvent jamais y parvenir.

D'une manière générale, sur cent sujets, cinquante passent une demi-heure sous le masque, pour la première fois, sans autre inconvénient qu'une certaine congestion de la face. Une quarantaine se trouve à la fin, près de la limite de l'effort. Enfin, parmi les derniers sont ceux qui sont trop nerveux pour supporter le masque, où dans un état physique qui les met dans l'impossibilité de respirer en dépression. Il s'agissait de mobilisés du service auxiliaire de 20 à 35 ans.

Il importe donc, lors de la construction de tout appareil respiratoire (appareils d'anesthésie y compris) de diminuer dans toute la mesure du possible les résistances au passage des gaz. En ce qui concerne les tuyaux, on évitera la forme annelée, tout au moins quant à la surface intérieure, à cause des remous d'air engendrés par chaque anneau, qui nuisent grandement à l'écoulement du fluide. La section sera d'au moins 20 millimètres de diamètre.

Enfin les boîtes contenant les produits de régénération et de purification seront de large section, et étudiés pour que leur résistance soit très faible.

CHAPITRE X

Les effets de l'espace nuisible

On connaît, dans les pompes à gaz, l'espace nuisible, qui est le volume mort, restant entre le piston et le fond de la pompe, plus le volume des tuyaux. Les masques protecteurs présentent un espace nuisible, parce qu'ils n'appliquent pas exactement sur la figure, et parce que les soupapes sont placées dans des alvéoles dont le volume n'est pas négligeable.

Certains appareils, abandonnés maintenant, fonctionnaient par aller et retour des gaz dans un même tuyau. Les gaz expirés traversaient la boîte de régénération, se rendaient dans le sac respiratoire, puis lors de l'inspiration, ils traversaient de nouveau cette boîte en revenant par le même chemin. On peut dire que l'espace nuisible était maximum. Quelques appareils d'anesthésie fonctionnent encore par ce système pendulaire qui est déplorable.

Le moyen d'éviter tout espace nuisible est de placer entre les lèvres du sujet un tube qui sert à l'expiration. L'inspiration se fait exclusivement par le nez. Ce dispositif présente quelques inconvénients : légère salivation et obligation de surveiller la respiration, parce que l'expiration par le nez soulève les bords du masque et fait perdre des gaz. Bien que le cahier des charges du Ministère de l'Armement ne soit pas opposé à l'emploi de l'embout buccal, les Services des Poudres préfèrent les inconvénients de l'espace nuisible à ceux du tube entre les lèvres.

L'espace nuisible peut changer dans d'importantes proportions les conditions de la respiration sous le masque : il se remplit lors de l'expiration de gaz viciés et, lorsque la soupe d'inspiration s'ouvre à son tour, ces gaz sont aspirés avant même l'air régénéré.

Pour exprimer dans la mesure du possible les modifications apportées à la respiration par l'espace nuisible, nous supposerons un masque de figure dans lequel cet espace résiduel soit de 150 centimètres cubes. Admettons que, par une judicieuse disposition des soupapes, le courant d'air inspiré ne se mélange que partiellement avec l'air de l'expiration précédente.

Le cas que nous choisissons à dessein est le moins grave que l'on puisse rencontrer habituellement. Admettons qu'approximativement cinquante centimètres cubes des gaz expirés resteront en permanence sans se mélanger avec l'air frais, à la manière des gaz résiduels du poumon.

Il se produira donc un mélange de 100 centimètres cubes d'air impropre à la respiration avec l'air inspiré. Si, au repos, l'inspiration est de 400 centimètres cubes, on voit qu'elle sera réduite pratiquement de un quart. Cette proportion diminue rapidement, il est vrai, lorsque l'amplitude des mouvements respiratoires augmente ; elle ne sera plus que de 1/8e si le volume inspiré atteint 800 centimètres cubes.

Le pourcentage d'oxygène deviendra dans le premier cas, environ 19 % et dans le second 20,4 %. L'hématose étant encore possible jusqu'à 17,5 %, on voit qu'il n'y a pas un inconvénient dirimant à cet abaissement de la teneur en oxygène.

Il en va autrement avec l'enrichissement du milieu en gaz carbonique. Car si la fatigue qui résulte d'un effort inspiratoire un peu amplifié est assez faible, celle qui est la conséquence de l'excitation du centre respiratoire n'est pas négligeable.

Quelle sera l'influence de l'espace nuisible considéré ci-dessus ?

Nous savons que dans le volume de 100 centimètres cubes d'air expiré qui remplit l'espace nuisible après l'expiration, il y aura 3 à 4 % de gaz carbonique, ce qui fait en moyenne 3 cc 5, et amène les 400 cc d'air inspirés à une teneur de 0,9 %. Nous avons vu que l'on pouvait admettre 1,50 % de CO^2 sans gêne appréciable ; mais observons que par la faute de l'espace nuisible, nous avons déjà les 2/3 de ce pourcentage. Or, nous avons pris à dessein un exemple choisi dans le cas le plus favorable. Nous aurions obtenu un chiffre beaucoup plus élevé en considérant un masque du type courant, à embase plate, où l'espace nuisible est compris entre 200 et 250 centimètres cubes.

Il convient en outre de tenir compte du gaz carbonique qui traverse l'épurateur sans être fixé (on n'obtient jamais un résultat parfait par le passage de gaz sur un produit granulé), on voit que le pourcentage de CO^2 peut aisément atteindre et dépasser 3 %.

On voit par là tout l'intérêt qui s'attache à la réduction de l'espace nuisible dans les appareils respiratoires.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE I

Description et caractéristique de fonctionnement d'un appareil à circuit fermé utilisant un peroxyde comme source d'oxygène

A titre d'application pratique de ce qui précède, nous décrirons un appareil respiratoire, établi sur les données physiologiques précédentes.

L'appareil comprend :

1° Un masque protège-figure, en caoutchouc, portant deux soupapes. La soupape d'admission est placée au niveau de la lèvre supérieure. La soupape d'expiration est au-dessous (Type Ajax).

2° De la soupape d'expiration, un tuyau annelé, garni intérieurement d'un tube lisse (pour éviter les remous et diminuer les condensations), descend vers le générateur.

3° Le générateur est une boîte amovible, agencée de telle sorte que l'air expiré descende au fond, puis se divise en deux portions distinctes. La première traverse un compartiment contenant un corps capable de fixer le gaz carbonique et la vapeur d'eau. La deuxième passe sur un peroxyde alcalin, et lui abandonne son gaz carbonique et sa vapeur d'eau, avec dégagement proportionnel d'oxygène.

Etant donnée la composition constante du peroxyde mis en œuvre, on règle une fois pour toutes à la construction, les deux portions de l'air exhalé, et l'appareil est prêt à fonctionner dans les conditions convenables.

Au-dessous du tube d'arrivée d'air est disposée une petite quantité de peroxyde. Elle est destinée au démarrage à froid ; la vapeur d'eau se condense dans le tube d'expiration, tombe sur le peroxyde et dégage de l'oxygène avec production de chaleur ; ceci suffit au démarrage de l'ensemble générateur.

La réunion des deux portions de gaz à la sortie du générateur reconstitue exactement l'atmosphère naturelle.

4° Le sac respiratoire, qui reçoit cet air artificiel, possède une capacité de 5 litres. Le volant d'azote est important, et les gaz se refroidissent d'autant mieux qu'ils ne sont pas soumis à une rotation

trop rapide. Un tuyau réunit le sac respiratoire au masque, qui porte à cet endroit la soupape d'inspiration.

La dépression à l'inspiration est insensible. Toute la résistance est disposée sur le trajet d'expiration. La section du générateur est considérable, sa hauteur faible. La résistance est moitié moindre que celle d'une cartouche filtrante.

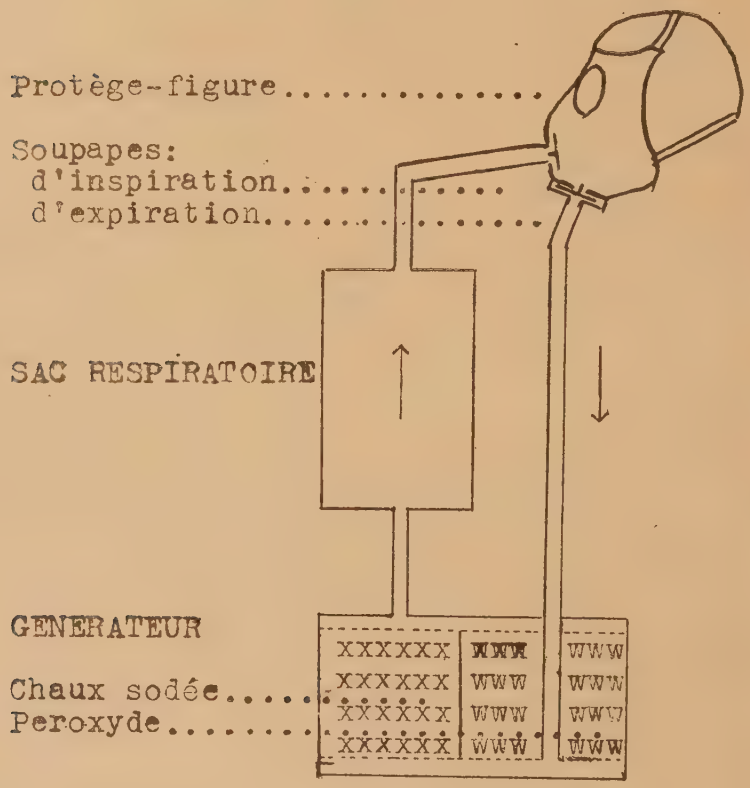
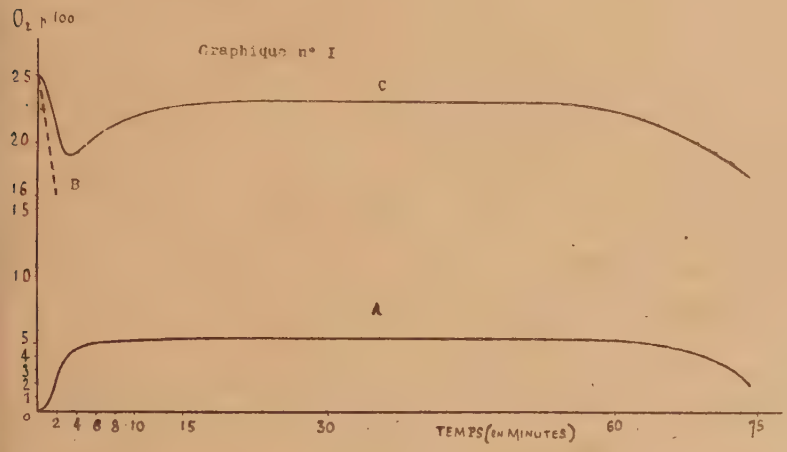


Schéma d'un appareil à cycle fermé où l'air est régénéré par un peroxyde

Fonctionnement. Par le dispositif employé, on voit aisément qu'il n'y a aucun risque de sous-oxygénation, ni d'excès de gaz carbonique laissé en liberté, tant qu'on ne dépasse pas la durée de réaction du peroxyde.

Le débit d'oxygène avec un peroxyde n'est pas d'une constance absolue. Le démarrage est lent à froid. Puis le débit augmente avec la température pour arriver au maximum, lorsque toute la vapeur d'eau et tout le gaz carbonique réagissent. Le palier obtenu à partir de ce moment commence à s'infléchir lorsque le peroxyde est presque complètement décomposé.

La courbe ci-dessous, est celle à laquelle nous nous sommes arrêtés, comme étant la plus favorable à l'euphorie, et compatible avec une durée de protection suffisante.



GRAPHIQUE N° 1

N. B. — La moitié des gaz expirés est dirigée sur le peroxyde régénérateur. Il existe une réserve de 300 cc d'oxygène gazeux dans le générateur.

La courbe A représente le débit du générateur. Elle parvient à un palier au moment où les gaz de la respiration réagissent intégralement sur le peroxyde, celui-ci ayant atteint sa température optima de réaction.

La courbe B partant de 25 p. 100 d'oxygène indique ce que serait la consommation de ce gaz, si aucun apport ne venait la compenser.

La courbe C est la résultante des deux phénomènes opposés. Ses indications correspondent aux dosages effectués sur l'atmosphère du sac respiratoire.

Le générateur fournissant à chaque instant une quantité d'oxygène égale à celle qui est consommée, la courbe C parvient rapidement à un palier où elle se maintient tant que le peroxyde est capable de réagir.

La courbe est établie en portant en abscisses les temps, et en ordonnées les pourcentages d'oxygène en volumes.

L'air prélevé est analysé dans la burette de BUNTE suivant la technique de TRADWELL : le gaz carbonique est absorbé par une solution de Soude à 25 p. 100, et l'oxygène par une solution d'Hydrosulfite de Sodium. L'Azote constitue le volume restant.

La courbe Ç, en trait plein, est la résultante de deux autres : l'une (A) qui part du point O est celle de la décomposition du peroxyde. L'autre (B), qui part du point correspondant à 25 p. 100 d'oxygène, est celle de l'utilisation de ce gaz contenu dans l'atmosphère intérieure, d'un volume de 6 litres. On obtient cette richesse en oxygène au départ, parce qu'on a eu soin de remplacer, lors de la construction, l'air du générateur par de l'oxygène (1). Ainsi 0 litre 30 de ce gaz s'ajoutent au volume de 1 litre qui existe dans l'ensemble de l'appareil.

Si le sujet en expérience accomplit quinze inspirations par minute de chacune 450 centimètres cubes, on voit qu'après la première minute il aura fait passer 6 l. 750 par son poumon, et qu'il aura abaissé la teneur de l'air en oxygène de 25 à 20 p. 100 environ. Après la deuxième minute, le pourcentage sera tombé à 16 p. 100.

Mais pendant ce temps le peroxyde a démarré. Son débit a cru comme l'indique la courbe (A) partant de l'origine des coordonnées. La résultante de ces deux courbes est la courbe C.

Lors de l'établissement de cette courbe, les prises de gaz pour le dosage de l'oxygène et du gaz carbonique ont été faites aux moments les plus intéressants : 2 minutes, 4 minutes, 15 minutes, 30 minutes, 1 heure et, après la fin de l'expérience, sur l'air restant dans l'appareil.

---

(1) Accessoirement, le remplacement de l'air par de l'oxygène a pour avantage d'empêcher la production éventuelle de dérivés oxygénés de l'azote.

On peut présumer a priori que les peroxydes alcalins, en libérant de petites quantités d'oxygène naissant (et probablement de l'ozone), étaient capables de produire à la longue avec l'azote de l'atmosphère de la boîte où on les conserve, des combinaisons de l'oxygène avec l'azote. Nous n'avons jamais pu mettre ce fait en évidence ; dans nos premières expériences, alors que l'air des générateurs n'était pas remplacé par de l'oxygène, il ne s'écoulait pas un temps appréciable entre le remplissage et la mise en œuvre.

Au cours de l'emploi, où le dégagement d'oxygène est important et se fait à une température élevée, nous n'avons jamais constaté la présence de vapeurs nitreuses. D'autre part, le protoxyde d'azote ne se manifesterait que lorsqu'il atteindrait un taux de 40 à 50 p. 100 par des effets d'excitation (mouvements spasmodiques) consécutifs à son pouvoir hypertenseur.

Il faut atteindre 85 p. 100 pour obtenir l'effet d'anesthésie. On voit combien on est de toute façon loin des teneurs où le protoxyde d'azote se manifeste. Quelques centièmes (et c'est au maximum tout ce qui peut se produire) passent rigoureusement inaperçus.

Quoiqu'il en soit, dût notre conclusion paraître en désaccord avec ce qui précède, dans l'ignorance où nous sommes de ce qui peut se passer au cours d'un stockage de plusieurs années, il nous a paru prudent d'éviter le contact prolongé du peroxyde avec l'azote. L'enrichissement en oxygène de l'atmosphère de l'appareil n'avait par ailleurs que des avantages.

Les chiffres trouvés, avec le réglage auquel nous nous sommes arrêté, sont les suivants :

Temps	P. 100 d'Oxygène	P. 100 de gaz carbonique
2 min.	19	0,2
4	19,5	0,3
15	23,5	0,5
30	24	0,8
60	22	1
75	16	1,5

On s'est placé, dans l'expérience qui a servi à l'établissement de la courbe de fonctionnement normal, dans des conditions moyennes. Le porteur a fourni un travail modéré ; marche à 4 km-heure sur terrain plat.

Nous avons vu, au chapitre VIII que la ventilation pulmonaire peut quadrupler lorsqu'on passe du repos au travail intensif. Toutefois, ce n'est pas un rapport exact qui lie la ventilation au besoin d'oxygène. La fixation par le sang peut être un peu supérieure à ce qu'elle est normalement, en cas de nécessité. On peut dire que, dans les conditions normales, la consommation d'oxygène double lorsqu'on passe du repos au travail normal.

Le générateur, tel qu'il est prévu, suffit aux besoins respiratoires d'un sujet au repos pendant 1 h. 40, et se trouve épuisé en 45 minutes environ, si le porteur fournit un travail important, comme par exemple terrassement ou manipulation de charges lourdes.

C'est en fonction de ces considérations, et en vue de réduire le plus possible le poids et l'encombrement du générateur, que la charge suffisante pour le résultat vu ci-dessus a été choisie.

L'impossibilité de remettre en marche, après refroidissement, une charge en partie épuisée, a conduit pour des raisons d'économie et de prudence, à fragmenter dans la mesure que nous indiquons la durée totale de protection. Celle-ci peut être aussi longue que l'on désire, puisqu'on peut changer le générateur sans sortir de l'atmosphère toxique.

Dans son livre « S'il y avait la guerre », le Prof. A. Guillaume fait aux appareils isolants (après avoir reconnu leurs qualités de protection totale), les reproches justifiés suivants ; nous en avons tenu compte dans notre dispositif selon les indications qui suivent chacune de ces critiques :

1° « Ces appareils ne peuvent protéger que peu de temps, le renouvellement de leur source d'oxygène n'est pas aisé, et à la portée de tous. »

Nous avons en partie résolu la difficulté par l'interchangeabilité du générateur, en cours de fonctionnement, ce qui ne demande qu'une manœuvre très simple. Ainsi est assurée une durée aussi prolongée qu'on le désire. Il est aisé d'emporter avec soi quelques générateurs de rechange, dont chacun ne pèse que 500 grs environ.

2° « Ils sont assez encombrants et d'un poids élevé. »

Dans notre dispositif, l'ensemble, y compris la cartouche filtrante, est contenu dans une boîte de 40 cm × 50 cm × 10 cm. Le poids total, en ordre de marche est de 5 kilos.

3° « Leur maniement est relativement délicat, et n'importe qui n'est pas apte à s'en servir. »

L'automatisme absolu du fonctionnement nous a paru être en effet une condition indispensable, et nous l'avons résolue. L'apprentissage est aussi simple que s'il s'agissait d'un masque filtrant.

4° « Ces appareils nécessitent des vérifications périodiques. »

Ici, il n'en faut pas d'autre que la vérification de la souplesse du sac respiratoire, des soupapes du masque, et de la douceur de fonctionnement du robinet à cinq voies.

5° « Leur prix est plus élevé que celui des premiers (filtrants). »

Cette objection reste valable, mais la simplicité extrême du mécanisme que nous proposons est un facteur d'économie dans la construction.

La plus grande difficulté d'établissement des appareils à circuit fermé est de les mettre d'accord avec les nécessités physiologiques de l'organisme ; nous espérons y être parvenus.

Conformité du dispositif avec les exigences du cahier des charges

(Notice du 25 Mars 1938)

Le cahier des charges du Ministère de l'Armement prévoit pour les appareils isolants, une série d'épreuves concernant la commodité, la solidité et les qualités de protection.

1° L'appareil ne doit pas avoir un poids exagéré, et il doit être facile à revêtir. Le porteur accomplira une marche sur terrain plat pendant 30 minutes à la vitesse de 4 km-heure, puis il montera et descendra cinq fois un escalier de 24 marches en trois minutes, puis il reprendra sa marche pour terminer l'essai en une heure.

2° Le démarrage à — 5° doit se faire en deux minutes, dont une minute pour la mise en place et une minute pour le démarrage du peroxyde.

Nous avons vu que deux procédés sont mis en œuvre pour que le taux d'oxygène reste sensiblement constant dans le cas d'un démarrage à — 5°.

3° Contrôle de l'étanchéité. Ce contrôle concerne aussi bien le masque de figure que les différents organes de l'appareil. Il ne doit pas se produire de rentrée de gaz pendant un séjour de 15 minutes dans une atmosphère contenant un gramme de bromure de Benzyle par mètre cube.

Il importe surtout que la résistance à l'expiration soit faible afin que les bords du masque ne se soulèvent pas ; il en résulterait la perte du volant d'azote et des rentrées de gaz toxique.

Essai de stabilité. Le porteur fera trois sauts de 50 cm de hauteur, sans rajuster l'appareil, puis trente mouvements de la tête de gauche à droite en trente secondes. Enfin il s'étendra sur le sol. Il ne doit pas y avoir de déplacement ni de fuites pendant cet essai.

4° Résistance à la respiration. La résistance du dispositif filtrant ne doit pas dépasser 24 millimètres d'eau pour un débit de 1.800 litres-heure. A l'expiration, la résistance ne doit pas dépasser 12 millimètres d'eau.

5° Visibilité. Les viseurs actuels donnent une visibilité supérieure à ce qui est demandé. En particulier, les produits antibuée ont conduit à renoncer au balayage des oculaires par les gaz inspirés.

6° Solidité. Les appareils doivent résister à plusieurs chocs obtenus par trois chutes libres de 1 m. 50 de haut sur un sol en ciment. Les matériaux qui constituent l'appareil sont vérifiés au point de vue de la résistance au déchirement.

7° L'imperméabilité est contrôlée.

8° La conservation de l'appareil à l'humidité est vérifiée après un séjour de 10 heures dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau entre 10 et 20°. Les générateurs sont soumis au même essai.

9° La pureté de l'oxygène doit être absolue. On tolère 4 p. 100 d'azote dans l'oxygène comprimé (c'est la présence de ce gaz qui oblige les constructeurs à prévoir une soupape de décompression).

L'oxygène fourni par la décomposition d'un peroxyde doit être exempt de dérivés de l'azote, ou d'autres gaz étrangers. Accessoirement, il ne doit pas se produire d'entraînement de poussières d'alcali caustique.

Nous verrons au chapitre III l'essai que nous souhaiterions voir prescrire par le cahier des charges pour la détermination du maximum admissible pour le volume de l'espace nuisible.

CHAPITRE II

Influence de certains facteurs sur le fonctionnement de l'appareil

Connaissant la courbe qui correspond au meilleur fonctionnement du dispositif, il est intéressant de voir dans quelle mesure, et de quelle façon peut varier la composition de l'air régénéré, par les modifications que l'on pourrait apporter aux divers organes de l'appareil.

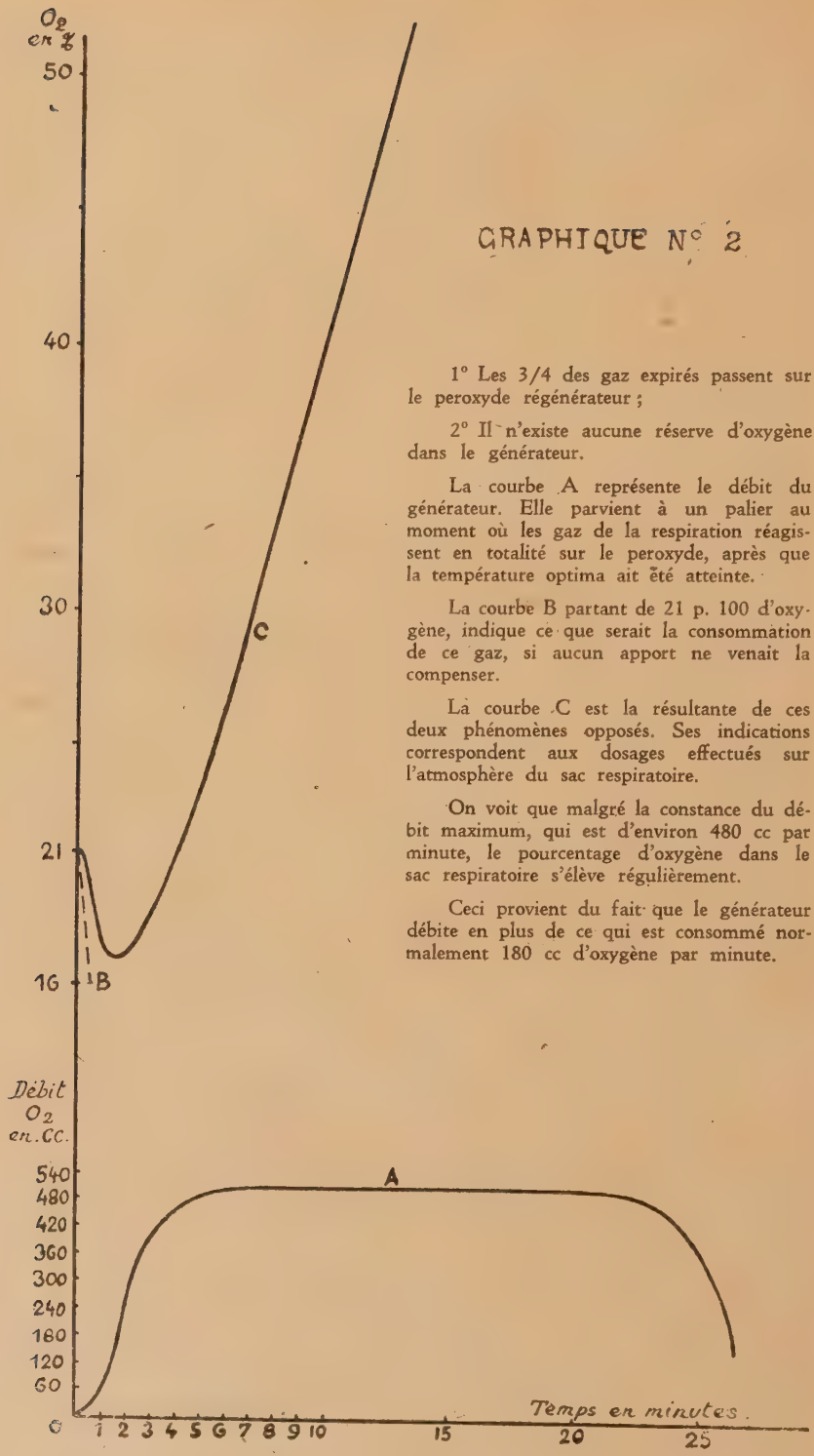
Autrement dit, par un retour en arrière, nous reverrons les différents points sur lesquels a porté notre expérimentation.

1° Débit d'oxygène. Nous avons vu que les gaz expirés étaient partagés en deux fractions à l'entrée dans le générateur. Supposons qu'il n'y ait pas d'oxygène gazeux dans le générateur. Nous réduirons la fraction des gaz qui passe sur la chaux sodée, afin d'élever le débit d'oxygène. Aurons-nous la même courbe, à un niveau plus élevé ? L'expérience montre que, par suite de l'échauffement plus considérable de la zone de réaction où se trouve le peroxyde, la vapeur d'eau qui s'était fixée sur la soude (résidu de la décomposition du peroxyde) est libérée et réagit sur une nouvelle couche de substance active. Il y a là un cercle vicieux, et la courbe de dégagement s'élève exagérément, après quoi sa chute est plus brutale.

D'autre part à chaque instant, le débit étant supérieur aux besoins respiratoires, l'atmosphère s'enrichit régulièrement en oxygène.

2° La température joue encore un rôle important au moment du démarrage. Il existe une température optima, pour laquelle la réaction du peroxyde, en présence de quantités d'eau et de gaz carbonique arrivant avec régularité, se fait avec constance. A froid, le démarrage est lent, et on voit le pourcentage d'oxygène tomber avec rapidité, pendant que la teneur en CO^2 de l'air s'élève proportionnellement.

Il serait donc nécessaire alors, de rattraper le retard, et on retomberait dans l'inconvénient que nous avons vu précédemment.



GRAPHIQUE N° 2

1° Les 3/4 des gaz expirés passent sur le peroxyde régénérateur ;

2° Il n'existe aucune réserve d'oxygène dans le générateur.

La courbe A représente le débit du générateur. Elle parvient à un palier au moment où les gaz de la respiration réagissent en totalité sur le peroxyde, après que la température optima ait été atteinte.

La courbe B partant de 21 p. 100 d'oxygène, indique ce que serait la consommation de ce gaz, si aucun apport ne venait la compenser.

La courbe C est la résultante de ces deux phénomènes opposés. Ses indications correspondent aux dosages effectués sur l'atmosphère du sac respiratoire.

On voit que malgré la constance du débit maximum, qui est d'environ 480 cc par minute, le pourcentage d'oxygène dans le sac respiratoire s'élève régulièrement.

Ceci provient du fait que le générateur débite en plus de ce qui est consommé normalement 180 cc d'oxygène par minute.

3° L'action de l'eau est inséparable de celle du gaz carbonique dans la réaction qui libère l'oxygène. Le cahier des charges du Ministère de la Guerre prévoit que le démarrage doit se faire à — 5°.

Il est évident qu'à cette température l'eau exhalée se condensera en partie sur les parois froides de l'appareil. Il faut donc faire en sorte que cette eau condensée soit conduite sur une réserve de peroxyde placée à cet effet, qui réagira immédiatement avec dégagement de chaleur.

Au bout de quelques expirations le tuyau qui se rend au générateur sera échauffé, et le cycle se déroulera normalement.

Ce ne sont que les basses températures qui font sentir leur effet, et seulement au moment du démarrage. Par la suite, toute la vapeur d'eau, et tout le gaz carbonique étant utilisés, le dégagement de chaleur est proportionnel au poids de peroxyde décomposé dans un temps donné.

Le dispositif de refroidissement des gaz à la sortie du générateur a pour principal objet de donner aux gaz respirables une température aussi voisine que possible de la température extérieure.

Mais dans le générateur, l'influence de la température extérieure est négligeable.

Expérimentalement, au bout de quelques minutes, les différences trouvées à l'analyse dans le pourcentage de l'oxygène (en fonction de la température extérieure) sont masquées par l'effet d'autres causes indépendantes, et plus importantes, comme par exemple : intensité de la respiration du sujet au début de l'expérience ; différences dans la grosseur de granulation du peroxyde, etc...

4° On voit qu'il est pratiquement impossible de débarrasser entièrement l'atmosphère d'un appareil à cycle fermé du gaz carbonique. Observons toutefois que la réaction de l'acide carbonique sur un peroxyde est plus exothermique que celle de la carbonatation de la soude. Il restera donc moins de gaz carbonique dans un appareil à régénération par peroxyde, que dans un appareil qui n'emploie que la chaux sodée ou la soude.

Il sera prudent de disposer d'une quantité d'alcali beaucoup plus importante que la quantité théorique ; on évitera ainsi l'efflorescence de la chaux sodée, qui augmente la résistance au passage des gaz, et introduit des poussières irritantes dans le circuit.

5° Le débit d'oxygène est intimement lié à la température qui règne

dans le générateur. Si le débit augmente, la température s'élève. Et en s'élevant, elle aide à la décomposition du peroxyde (par libération d'eau) comme nous l'avons vu.

On fera en sorte que les zones de réaction ne se localisent pas à des espaces trop petits. Ceci dépend de la disposition des produits actifs. Le refroidissement du générateur sera aussi étudié pour que la température optima ne soit jamais dépassée dans une mesure susceptible de modifier le débit de l'oxygène.

Le confort du porteur est aussi directement lié à cette température ; le sac respiratoire doit pouvoir, par son importance qui conditionne la vitesse de rotation des gaz, refroidir suffisamment l'air inspiré.

6° Il serait très aisé de satisfaire à tous ces desiderata, si ces réactions se faisaient au laboratoire, dans des dispositifs où les gaz circuleraient sous l'effet d'un moteur. Mais il en est autrement lorsque c'est le poumon qui provoque à la fois le passage de l'air dans ses alvéoles, et dans les dispositifs régénérateurs.

Pour le premier cas, on disposerait les granulés actifs, en longueur pour multiplier les contacts.

Ici, au contraire, on est tenté de les disposer en surface, sur des tamis, que les gaz expirés lèchent, ou bien encore en colonnes plus larges que hautes afin d'offrir moins de résistance au passage des gaz.

Nous avons mesuré les inconvénients de la dépression, et des efforts respiratoires prolongés.

La forme des chambres à réaction sera le résultat d'un compromis : on adoptera les dimensions, la grosseur de granulation, et le dispositif qui donnera une régénération satisfaisante avec une résistance faible.

7° Dans nos premières expériences, nous avions complètement éliminé l'espace nuisible, en réalisant le sens unique absolu. L'inspiration se faisait librement par le nez, dans l'atmosphère du masque. L'expiration, grâce à un tube souple placé entre les lèvres, ne donnait lieu à aucune rentrée d'air expiré, d'autant plus qu'un jeu de soupapes rendait tout retour impossible.

Dans ces conditions, le taux de gaz carbonique restait infime, compte tenu de l'imperfection du dispositif employé à cette époque. L'emploi d'un masque de modèle ordinaire, avec suppression de l'embout buccal, a donné des résultats que le calcul pouvait faire prévoir.

Le Prof. Dautrebande a indiqué un moyen physiologique pour mesurer le volume de l'espace nuisible, par la résultante sur l'amplitude

respiratoire de volumes étalonnés, jouant le rôle d'espace nuisible. Dans ces expériences, toute autre cause pouvant agir en plus était éliminée.

Observons toutefois qu'il existe un espace nuisible naturel, qui comprend les bronches et les organes externes de la respiration. Si on lui ajoute un espace mort peu important, la compensation se fait vite et on ne peut appliquer aisément la méthode physiologique de mesure.

Un faible espace nuisible, qui ne provoque qu'une amplification à peine mesurable des mouvements pulmonaires, aura-t-il néanmoins une répercussion sur la composition des gaz régénérés ?

La suppression de l'embout buccal, toutes choses restant égales par ailleurs, nous a permis de mesurer l'incidence d'un espace mort.

L'espace qui existe entre le masque et la figure n'entre pas en entier en ligne de compte : à moins qu'on ne cherche à faire un balayage des oculaires, comme dans le masque de l'armée, l'air qui pénètre par la soupape d'inspiration suit le plus court trajet pour parvenir au nez. L'étude des veines gazeuses en aérodynamique montre qu'un mélange relatif se produit le long d'une veine en mouvement par des tourbillons tangentiels, mais qu'il reste peu important. Cet espace réduit, qui seul nous intéresse, a été dénommé par le Prof. DAUTREBANDE, espace nuisible physiologique.

Nous avons donc choisi un masque dans lequel la soupape d'inspiration est très proche du nez.

L'inspiration, au repos, ayant été trouvée égale à 400 centimètres cubes et l'espace nuisible estimé à 50 centimètres cubes, quelle doit être la teneur en CO^2 dans le sac respiratoire ?

50 cc d'air expiré, à 4 p. 100, contiennent 2 cc de gaz carbonique. On les retrouvera exactement à l'expiration suivante (après avoir été inhalés) en plus de l'élimination normale.

Mais l'espace nuisible est balayé dans les deux sens, et à l'expiration un volume d'air pur de 50 cc sera refoulé avant que l'air expiré passe à son tour. En définitive, tout se passe comme si le volume d'air inspiré était réduit à 250 cc et enrichi de 1 p. 100 de CO^2.

Pour le générateur, les 50 cc d'air pur qui passent les premiers, ramènent exactement à 4 p. 100 la teneur en gaz carbonique des gaz qui y entrent.

L'effet de l'espace nuisible ne se traduit donc pas par une élévation du taux de CO^2 dans le sac respiratoire.

Mais il n'en sera pas de même dans le masque. Or c'est là que la composition de l'air inspiré a toute son importance. On ne peut faire

aucun prélèvement de cette atmosphère : lors de l'expiration on trouvera de l'air ayant la composition de l'air rejeté, et lors de l'inspiration, soit de l'air résiduel, soit plus tard de l'air venant du sac respiratoire.

Pour se rendre compte de ce qui se passe pour différentes valeurs de l'espace nuisible, le tableau ci-dessous donne, en fonction de ses variations, le pourcentage de l'oxygène et le pourcentage de gaz carbonique aspirés. L'aspiration est de 400 cc.

Espace nuisible	Oxygène à l'inspiration p. 100	Gaz carbonique inspiré p. 100	Gaz carbonique dans le sac p. 100
0	21	0	0.02
50 cc	20.4	0.50	0.045
100	19.7	1	0.09
150	19.1	1.5	0.135
200	18.5	2	0.18

Chacune de ces expériences ne dure que quelques minutes par hypothèse. Si le temps intervenait dans le calcul, il faudrait tenir compte de ce que le gaz carbonique n'étant fixé que dans une proportion de 95 p. 100, l'enrichissement de la teneur dans le sac respiratoire viendrait régulièrement élever le taux de ce gaz dans le masque, ce qui constitue un cercle vicieux. On voit donc que les courbes seraient rapidement croissantes. Dans le même temps, la courbe résultant des analyses de l'air du sac respiratoire, n'indique que des chiffres très faibles et négligeables en pratique.

L'oxygène, qui tombe à 18,5 dans l'exemple choisi, restera dans un pourcentage très voisin de 21 p. 100 dans les résultats d'analyse.

Dans la pratique, l'augmentation de la ventilation pulmonaire, consécutive à l'inhalation de gaz carbonique, diminuera dans de grandes proportions l'incidence de l'espace nuisible ; c'est par convention que nous avons admis que l'inspiration restait égale à 400 cc ; elle s'élèvera à 800 cc dans le second cas considéré, ce qui correspondra à une diminution de moitié du volume perdu.

En même temps se produit une élévation du seuil d'excitation du centre respiratoire, et il se fait une sorte d'équilibre, ou plus exactement d'équilibres successifs, en raison de l'enrichissement en gaz carbonique de l'air régénéré.

Comme ce processus présente les dangers que l'on sait, nous conclurons que dans tout appareil à cycle fermé, il est prudent de ne pas dépasser cent centimètres cubes d'espace nuisible physiologique.

Les appareils isolants actuels (Fenzy, Lemoine, etc...) sont adaptés sur un protège-figure du genre de l'A.R.S. Nous verrons au chapitre III, lorsque nous donnerons une méthode d'appréciation du volume de l'espace nuisible la valeur que ce dernier peut avoir.

Précédemment, les appareils Draeger et Fenzy comportaient un embout buccal, par lequel se faisait la respiration, le nez étant obstrué au moyen d'une pince. L'Oxymasque, sorte d'abri individuel, comportait une cagoule. Dans ce dernier appareil, l'espace nuisible était considérable ; l'air ne passait que par fractions sur le fixateur de CO^2. Le fonctionnement était plus imparfait encore que dans l'appareil Draeger, où le système pendulaire créait entre la bouche et la cartouche à soude, un espace nuisible énorme.

Les appareils Fenzy comportent des soupapes d'admission et d'expiration qui réalisent un sens unique satisfaisant, avec un faible espace nuisible. Ces appareils sont encore en service dans l'armée, bien que le système de la respiration se faisant uniquement par un embout buccal ait été universellement abandonné.

CHAPITRE III

Procédé physico-chimique de mesure de l'espace nuisible physiologique d'un masque respiratoire

La méthode est fondée sur l'élimination incomplète du gaz carbonique par l'effet de l'espace nuisible, élimination qui est inversement proportionnelle au volume de cet espace.

Dans une première expérience, on déterminera l'élimination normale du sujet qui servira aux essais.

A cet effet, aspirant à l'air libre, il expirera dans un spiromètre, en surveillant la graduation afin d'expirer exactement 400 cc par exemple. On recueillera quatre expirations.

L'analyse des 1.600 cc obtenus montrera par exemple 4 p. 100 de gaz carbonique.

Dans une seconde expérience, le sujet respirera avec un masque, dont l'espace nuisible physiologique sera par hypothèse de 100 cc.

La première expiration introduira dans le spiromètre :

1° 100 cc venant du balayage de l'espace nuisible ;

2° 300 cc d'air contenant 4 p. 100 de gaz carbonique, soit 12 cc.

Enfin, il restera dans l'espace nuisible 100 cc d'air contenant 4 cc de CO^2.

La première inspiration balaiera l'espace nuisible et on aura :

1° 100 cc contenant 4 cc de CO^2 ;

2° 300 cc d'air pur.

A la deuxième expiration, il arrivera au spiromètre :

1° 100 cc d'air pur (balayage de l'espace nuisible) ;

2° 300 cc d'air contenant 12 cc de CO^2 + les 3/4 du CO^2 qui était resté dans l'espace nuisible, soit 3 cc = 15 cc, et ainsi de suite.

Dans les trois tableaux ci-dessous nous donnons les résultats des calculs faits pour des espaces nuisibles de 100, 200 et 300 cc.

Espace nuisible de 100 *cc*

Expiration de 400 cc, expiration normale à 4 p. 100 CO^2 :

Expiration N°	Gaz parvenant au spiromètre		Aspiration N°	Atmosphère de l'espace nuisible	Air pur
	100 cc air pur	300 cc air vicié CO^2 volume :		100 cc CO^2 volume :	300 cc CO^2 vol. :
1		12 cc	1	4	0
2		15	2	5	0
3		15,75	3	5,25	0
4		15,94			
		58,69			

Il y a en fin d'expérience 58,69 de CO^2 dans 1600 cc soit 3,66 p. 100.

Espace nuisible de 200 *cc*

Expiration de 400 cc, expiration normale à 4 p. 100 CO^2 :

Expiration N°	Gaz parvenant au spiromètre		Aspiration N°	Atmosphère de l'espace nuisible	Air pur
	200 cc air pur	200 cc air vicié CO^2 volume :		200 cc CO^2 volume :	200 cc CO^2 vol. :
1		8 cc	1	8	0
2		12	2	12	0
3		14	3	14	0
4		15		15	0
		49			

Il y a en fin d'expérience 49 cc de CO^2 dans 1600 cc soit 3 p. 100.

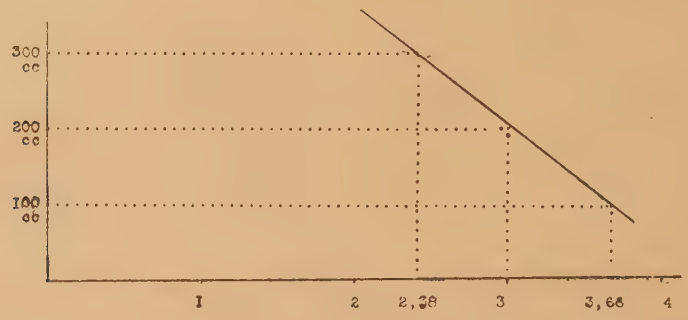
Espace nuisible de 300 *cc*

Expiration de 400 cc, expiration normale à 4 p. 100 de CO^2 :

Expiration N°	Gaz parvenant au spiromètre		Aspiration N°	Atmosphère de l'espace nuisible	Air pur
	300 cc air pur	100 cc air vicié CO^2 volume :		300 cc CO^2 volume :	100 cc CO^2 vol. :
1		4	1	12	0
2		10	2	30	0
3		11,5	3	34,50	0
4		12,62			
		38,12			

Il y a en fin d'expérience 38,12 cc de CO^2 dans 1600 cc soit 2,38 p. 100.

La courbe suivante, qui est une droite, indique, en fonction du pourcentage de gaz carbonique trouvé, la valeur de l'espace nuisible physiologique.



Détermination du volume de l'espace nuisible d'un masque donné.

1° Dans une première expérience, on « étalonne » un sujet, c'est-à-dire qu'on dose le gaz carbonique dans l'air qu'il expire. Soit *n* ce pourcentage.

2° On construit la courbe qui concerne ce sujet.

Il suffit, pour déterminer les trois points nécessaires, de multiplier *n* par les coefficients suivants :

$n \times 14{,}67 =$ A cc de CO^2 dans 1600 cc avec un espace nuisible de 100 cc.

$n \times 12{,}25 =$ B cc de CO^2 dans 1600 cc avec un espace nuisible de 200 cc.

$n \times 9{,}53 =$ C cc de CO^2 dans 1600 cc avec un espace nuisible de 300 cc.

On calcule les pourcentages de gaz carbonique correspondant respectivement à A, B et C cc dans 1.600 cc.

Ces trois chiffres sont portés en abscisses, les espaces nuisibles correspondants sont portés en ordonnées.

On a donc trois points pour construire la courbe étalon du sujet.

3° Dans la seconde opération, le sujet expire quatre fois 400 cc dans le spiromètre, après avoir revêtu le masque à étudier.

(On aura soin de recueillir la première expiration après la pose du masque, faute de quoi les résultats seraient faussés).

Il ne reste plus qu'à doser le gaz carbonique dans l'air du spiromètre, en calculer le pourcentage, le porter en abscisses, et lire en ordonnées le volume de l'espace nuisible à déterminer.

Variante de la méthode précédente

Il est possible de se passer de sujet, et de le remplacer par un dispositif mécanique.

Le masque à étudier est placé sur une tête, dans laquelle on aura reproduit aussi exactement que possible la disposition des conduits respiratoires externes.

Deux pompes, l'une aspirante, l'autre foulante, aspireront l'air pur et refouleront un mélange d'air et de gaz carbonique connu, dans des conditions qui se rapprocheront autant que possible de la réalité.

Comme précédemment, on pourra construire la même courbe ; prenons comme exemple un air contenant 4 p. 100 de CO^2 :

Pour un espace nuisible de 100 cc, chaque « expiration » contiendra 300 cc à 4 p. 100, soit 12 cc de gaz carbonique.

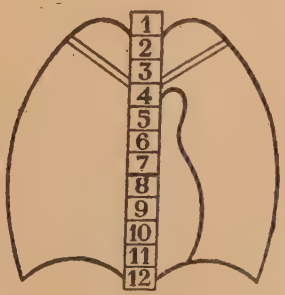
Pour un espace nuisible de 200 cc et de 300 cc on aura respectivement :

200 cc à 4 p. 100 soit 8 cc
100 cc à 4 p. 100 soit 4 cc.

Les pourcentages dans le spiromètre seront :

pour 100 cc d'espace nuisible : 3 p. 100
200 cc — 2 p. 100
300 cc — 1 p. 100.

En employant toujours le même mélange de base, les déterminations sont simples et rapides. Il n'existe dans ce procédé aucun enrichissement de l'air inspiré puisqu'on le rejette au dehors. Le nombre de coups de pompe donnés est indifférent. On veillera seulement à donner aux gaz une vitesse identique à celle qu'ils auraient avec une respiration réelle.



Résultats de mesures des espaces nuisibles de différents masques

Nous avons choisi, à titre d'exemple, trois protège-figure qui représentent l'échelle des formes possibles.

1° Le masque de l'armée (A.R.S.) qui présente la forme générale d'un dièdre dont l'arête est horizontale.

2° Le masque de la marine, dont la face, en métal, est plate, et reliée à la figure par un soufflet disposé à angle droit.

3° Le masque Ajax, en caoutchouc, dont la forme générale est un dièdre à arête verticale.

Le second de ces appareils est plus favorable aux faces camuses Le troisième convient mieux aux faces « en lame de couteau ».

Le tableau suivant schématise les caractéristiques de ces appareils :

	Marine	A R S	Ajax
Forme de la face	Plate.	Dièdre à arête horizontale.	Dièdre à arête verticale.
Arrivée inspiration ...	En haut	Sous-oculaire	Devant le menton.
Départ expiration ...	En bas	Devant la bouche.	Devant la bouche.

Les mesures ont été faites à 5 reprises pour chacun de ces trois modèles, et ont donné des résultats assez constants : les variations en plus et en moins ne dépassant pas en amplitude 0 cc 30.

La moyenne, adoptée comme résultat exact, a été pour chacun des appareils :

A R S	CO^2 = 3 p. 100
Marine	CO^2 = 3,20 p. 100
Ajax	CO^2 = 3,30 p. 100.

L'élimination normale de l'expérimentateur (n) était de 5 p. 100. Ces chiffres portés sur la courbe ont donné les espaces nuisibles physiologiques suivants :

A R S	200 cc
Marine	170 cc
Ajax	150 cc

Il convient de noter que la forme convexe de la figure de l'expérimentateur (type respiratoire) donnait dans un masque du type Ajax un des meilleurs résultats possibles. Mais comme dans l'A.R.S. et le masque de la marine, l'appareil était mis en place sans que le nez touche la paroi, on ne peut pas dire que ces appareils se trouvaient défavorisés.

Comme expérience complémentaire, nous avons essayé le masque Ajax, en appliquant à la main les orifices d'entrée et de sortie des gaz, contre le nez et la bouche. Le dosage du gaz carbonique éliminé a montré un pourcentage de 3,7 p. 100, ce qui correspond à un espace nuisible de 90 cc.

Il est souhaitable que le cahier des charges pour la réception des masques (filtrants comme isolants) prévoie une normalisation du procédé de mesure de l'espace nuisible (par exemple par un procédé automatique du genre de celui que nous préconisons) et fixe un minimum qui conditionne une teneur admissible en gaz carbonique dans l'air inspiré. Il est évident, après ce qui précède, que le simple taux limite du gaz carbonique dans le sac respiratoire (2 p. 100) est tout à fait insuffisant pour définir la valeur d'un appareil respiratoire à circuit fermé, au point de vue de la qualité de l'air régénéré. Le paragraphe à ajouter à la notice sur l'agrément des appareils individuels de protection, pourrait être rédigé comme suit.

PROJET

Mesure de la valeur de l'espace nuisible physiologique d'un masque

La mesure est fondée sur l'élimination incomplète du gaz carbonique par l'effet de l'espace nuisible.

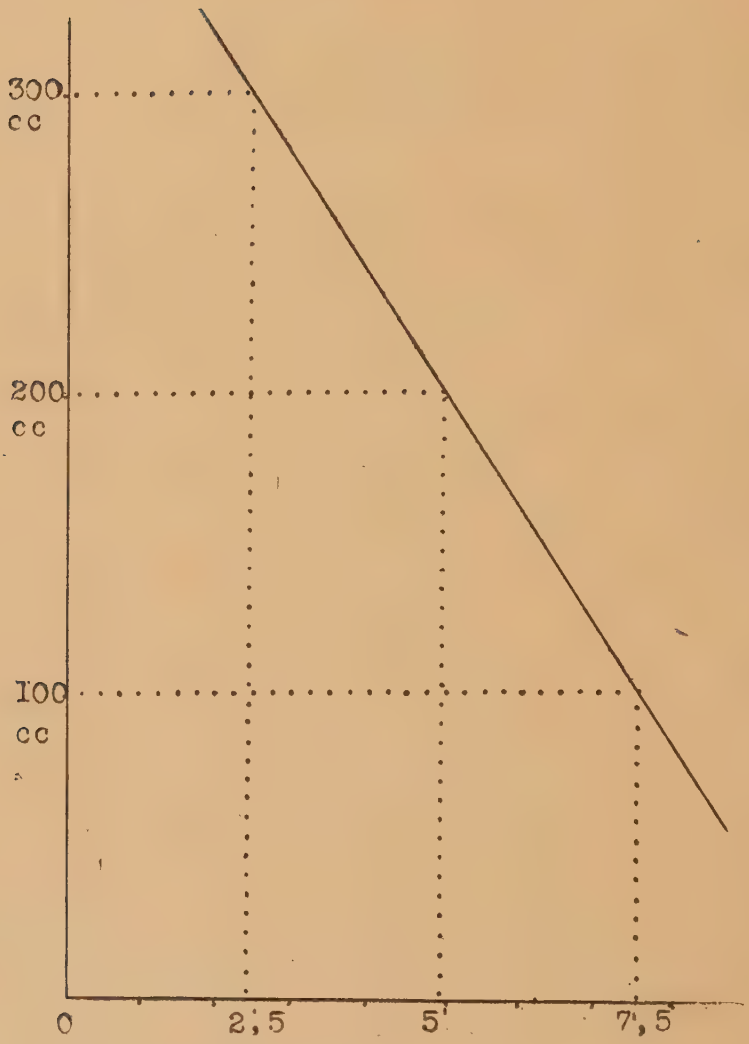
Le dispositif d'essais comprend : une tête de bois de modèle normalisé (trois tailles sont prévues pour les trois dimensions de masques), comportant deux tubes de 20 millimètres de diamètre débouchant à la place du nez.

Une pompe aspire par le tube d'aspiration 400 cc qui sont rejetés au dehors.

Une pompe foulante amène par l'autre tube 400 cc d'un mélange d'air et de gaz carbonique (10 p. 100 de CO^2). Le débit est réglé à 1800 litres-heure. La soupape d'expiration du masque est reliée à un réservoir vide de gaz.

Le cycle « aspiration-expiration » est répété plusieurs fois.

Les gaz réunis dans le réservoir sont analysés : le pourcentage de gaz carbonique trouvé est porté en ordonnée sur le graphique ci-joint. On lit en ordonnées la valeur de l'espace nuisible physiologique. Ce volume ne devra pas être supérieur à 100 cc.



Un espace nuisible laisse passer :

Pour une valeur de 100 cc : 30 cc CO^2 soit 7,50 p. 100
200 cc : 20 cc CO^2 soit 5 p. 100
300 cc : 10 cc CO^2 soit 2,50 p. 100.

CONCLUSIONS PRATIQUES

Les points essentiels de la respiration, que nous avons rappelés, appliqués au cas particulier de la respiration dans un espace clos, nous ont conduit aux conclusions suivantes :

1° L'apport d'oxygène, contrairement à ce qu'on pense de prime abord, ne doit pas constituer le principal souci d'un constructeur d'appareils à circuit fermé. Pourvu que le taux d'oxygène ne s'abaisse pas au-dessous de 19 p. 100, et ne dépasse pas 25 p. 100, il ne produira aucune conséquence fâcheuse pour le porteur.

2° Le gaz carbonique, en raison de l'action nocive qu'il exerce à la longue, devra être soigneusement éliminé. On pourra tolérer 2 p. 100, teneur que nous considérons comme la limite de l'euphorie.

Il ne faut pas perdre de vue que pour diverses raisons comme un travail intense brutalement imposé, le taux de CO^2 peut s'élever momentanément à 3 p. 100 sans inconvénient.

On s'efforcera de ne jamais dépasser normalement 1,5 p. 100.

3° Le degré hygrométrique sera maintenu dans les limites euphoriques de 35° à 85°. Un degré hygrométrique trop faible est sans autre inconvénient que celui de procurer des sensations désagréables. Un degré trop élevé, approchant du point de saturation, peut avoir des conséquences sérieuses pour le patient, tels que malaises, si la température vient à s'élever en même temps.

4° On veillera à empêcher les fuites, qui ont pour résultat la diminution du volant d'azote ; les conséquences seraient :

a) une suroxygénation si on rétablit le volume primitif ;

b) Une rotation trop rapide des gaz restants, par suite de leur diminution de volume, ce qui éléverait leur température.

5° A la construction, on apportera un soin particulier à la disposition des conduits d'air et des blocs épurateurs et régénérateurs, pour diminuer dans toute la mesure du possible la résistance, et la dépression qui en est la conséquence.

6° L'élimination de l'espace nuisible est le desiratum essentiel auquel il faut s'efforcer de satisfaire. Nous avons montré l'incidence

de son volume sur l'hématose et sur le taux de gaz carbonique réellement inhalé, qui est très supérieur à celui qu'on trouve au même moment dans le sac respiratoire.

L'impossibilité de faire le dosage dans le masque rend indispensable l'estimation du volume de gaz carbonique résiduel qui est réinspiré à chaque développement du poumon.

7° Quelque parfait que soit un appareil à cycle fermé, un entraînement et une discipline respiratoire sont indispensables pour que la respiration soit normale, et que le facteur émotivité soit éliminé.

8° Au cours de cette étude et dans une seconde partie qui est une application pratique des données théoriques que nous avons exprimées, nous avons donné les principes de fonctionnement d'un appareil à circuit fermé, spécialement étudié pour éviter les principaux inconvénients qui ont fait l'objet de notre expérimentation.

9° Nous avons enfin exposé une méthode simple et pratique, pour la détermination du volume physiologique de l'espace nuisible, dont nous avons à plusieurs reprises souligné l'intérêt. Ceci nous a conduit à émettre le vœu que le cahier des charges pour l'agrément des appareils de protection individuelle soit complété par une vérification du volume de l'espace nuisible.

Nos expériences nous permettent de fixer à 100 cc au maximum, le volume admissible pour l'espace nuisible d'un masque répondant aux exigences des physiologistes.

Bibliographie

Bruère P. — *Protection collective en atmosphère confinée contre les gaz de bombardement.* Bull. Doct. Pharm., Sept.-Oct. 1930.

Principes d'alimentation rationnelle des collectivités. L. Fournier, Edit., Paris 1922.

Organisation biochimique de la défense passive contre le péril aérien. Bull. Doct. Pharm., 1933.

Bruère et Vouloir. — *Face au péril aéro-chimique.* Ed. Médicis, Paris, 1936.

Bruère et Leric. — *Problèmes d'hygiène posés par la protection collective contre le péril aérien.* Vigot, Ed., Paris, 1937.

Cot C. — *Asphyxiés du temps de paix et du temps de guerre.* Lib. Lorillot, Paris, 1932.

Dautrebande (Prof.). — *Les gaz toxiques.* Masson, Edit., Paris, 1933.

Dautrebande, Philippot et Dumoulin. — *Le problème des masques destinés à la population civile passive.* « Gaz de Combat », Janvier 1935.

Genaud P. — *Physiologie du masque. Protection contre les gaz de combat.* Vigot, Edit., 1933.

Guillaume (Prof.). — *S'il y avait la guerre.* Vigot, Edit., 1939.

Haldane. — *Respiration.* 1937.

Henderson. — *Le sang, système physico-chimique.* Les Presses Universitaires de France.

Hederer et Histin. — *L'arme chimique et ses blessures.* Baillère, Edit., Paris, 1935.

Jaubert G. — *Température-humidité.* Revue « Gaz de Combat », Mai 1939.

Ledoux. — *Traité de conditionnement d'air.* Paris, 1931.

Lebebvre et August. — *C. R. Académie des Sciences.* 3 Février 1930.

Moureu Ch. — *La chimie de la guerre.* Masson, Edit., Paris.

Renaud R. — *La protection individuelle isolante.* Revue « Gaz de Combat », Juillet 1939.

Clermont-Ferrand, le 15 Mai 1942.

Le Président du Jury :

CH. LAPP.

VU ET APPROUVÉ :

Clermont-Ferrand, le 16 Mai 1942.

Le Doyen de la Faculté de Pharmacie :

A. SARTORY.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Clermont-Ferrand, le 18 Mai 1942.

Le Recteur de l'Académie,

Président du Conseil de l'Université,

Pour le Recteur,

Le Vice-Président du Conseil de l'Université,

A. DANJON.

Table des Matières

AVANT-PROPOS 5
INTRODUCTION 7

Première Partie

CHAPITRE I. — Rappel des données essentielles concernant la respiration 9
CHAPITRE II. — Principes de fonctionnement et description schématique des principaux types d'appareils existants. . . 12
CHAPITRE III. — Effets produits par la variation du taux d'oxygène 14
CHAPITRE IV. — Effets produits par la variation du taux de gaz carbonique. Son rôle physiologique, sa toxicité . . . 18
CHAPITRE V. — Le degré hygrométrique en fonction de la température 22
CHAPITRE VI. — Le volant d'Azote 24
CHAPITRE VII. — Les poisons respiratoires 25
CHAPITRE VIII. — Variations du débit respiratoire avec le travail 26
CHAPITRE IX. — Les effets de la dépression dans les appareils clos 27
CHAPITRE X. — Les effets de l'espace nuisible 32

Deuxième Partie

CHAPITRE I. — Description et caractéristiques de fonctionnement d'un appareil à circuit fermé, utilisant un peroxyde comme source d'oxygène 35
CHAPITRE II. — Influence de certains facteurs sur le fonctionnement de l'appareil 43
CHAPITRE III. — Procédé physico-chimique de mesure de l'espace nuisible physiologique d'un masque respiratoire. 50
CONCLUSIONS PRATIQUES 57
BIBLIOGRAPHIE 59